



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
(ENERGÍA) – (DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN EDIFICACIONES)

**MÉTODO PARA DEFINIR REQUERIMIENTO, POTENCIAL Y APROVECHAMIENTO DE
LA ENERGÍA SOLAR EN LOS EDIFICIOS:**
Diseño Bioclimático, Iluminación Natural, Tecnología Térmica y Fotovoltaica

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

(ENERGÍA – DISEÑO BIOCLIMÁTICO EN EDIFICACIONES)

P R E S E N T A:

ALBERTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

TUTOR:

DAVID MORILLÓN GÁLVEZ

INSTITUTO DE INGENIERÍA

Ciudad Universitaria, Cd. Mx. 2017

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Rafael Almanza Salgado
Secretario: Dra. Manuela Azucena Escobedo Izquierdo
Vocal: Dr. David Morillón Gálvez
1^{er.} Suplente: Dr. Víctor Hugo Hernández Gómez
2^{d o.} Suplente: Dr. José Diego Morales Ramírez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis:

Facultad de Ingeniería, Ciudad Universitaria, Ciudad de México.

TUTOR DE TESIS:

NOMBRE

FIRMA

Dedicatorias

A mi mamá por apoyarme en todo momento, por sus consejos, sus valores, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero sobre todo, por su amor.

A mi papá por los ejemplos de perseverancia y constancia que lo caracterizan y que me ha infundado siempre, por su apoyo incondicional y aunque la distancia nos separe siempre estás en mi corazón.

A Nataly por ser parte fundamental de mi vida así como su apoyo en todo momento, siempre serás el amor de mi vida.

A mis hermanos Cristina, Angélica y Salvador, por estar conmigo y apoyarme siempre.

A mis sobrinos Clau, Jes, Nanen, Marifer, Ga y Christian por sus ocurrencias y hacerme sonreír cuando más lo necesito.

Agradecimientos

De manera muy especial quiero agradecer a mi asesor de tesis el **Dr. David Morillón**, por compartir sus conocimientos, así como por su paciencia, consejos y motivación que me han permitido tener una formación profesional de calidad, sinceramente gracias por su confianza y apoyo.

A la **Dra. Azucena, Dr. Rafael, Dr. Víctor y Dr. Diego** por compartir sus conocimientos y contribuir a la culminación de este trabajo.

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** que me ha brindado la oportunidad de formarme como profesional, es un orgullo incomparable pertenecer a la máxima casa de estudios.

Al **CONACYT** y al **Programa de Maestría y Doctorado** por el apoyo brindado para el desarrollo de este trabajo.

INDICE

RESUMEN.....	XIII
INTRODUCCIÓN	1
1.0 Antecedentes	4
1.1 Metodologías para aprovechar la energía solar en los edificios.....	4
1.1.1 Estudios de aplicaciones de la energía solar en los edificios residenciales.....	8
1.2 Los edificios energéticamente sustentables	11
1.3 Programas normas y asociaciones en México concernientes a la eficiencia energética y utilización de la energía solar en los edificios residenciales.....	15
1.4 Conclusiones.....	17
2.0 El sector residencial y el recurso solar.....	18
2.1 Sector residencial	18
2.1.1 Uso de la energía en el sector residencial	18
2.1.2 Elementos de una vivienda sustentable energéticamente	19
2.1.3 Gases de efecto invernadero	20
2.2 Recurso solar	21
2.2.1 La energía solar aprovechada en forma pasiva	22
2.2.1.1 Formas de transmisión de calor.....	23
2.2.1.2 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas	24
2.2.1.2.1 Dispositivos de control solar pasivos	25
2.2.1.3 Iluminación natural	27
2.2.1.3.1 Conceptos de iluminación natural	27
2.2.1.4 Calentamiento solar de agua	29
2.2.2 La energía solar aprovechada en forma activa	30
2.2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos	30
2.2.2.1.1 Conceptos de los Sistemas Fotovoltaicos.....	30
3.0 Método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios: Diseño Bioclimático, Iluminación Natural, Tecnología Térmica y Fotovoltaica	32
3.1 Entorno.....	33
3.1.1 Información general	33
3.1.2 Diagnóstico	34
3.1.2.1 Estudio del Bioclima.....	35
3.1.2.2 Radiación solar	39
3.1.2.2.1 Análisis de la trayectoria solar: gráfica solar	39
3.1.2.2.2 Evaluación del recurso solar: potencial	42
3.1.2.2.2.1 Irradiación global.....	43
3.1.2.2.2.2 Irradiación difusa y directa	42
3.1.2.2.2.3 Irradiación horaria	44
3.1.2.2.2.4 Irradiación sobre un plano inclinado.....	45
3.1.3 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares.....	46
3.1.3.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva	47
3.1.3.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	47
3.1.3.1.1.1 Control solar.....	48
3.1.3.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio	49

3.1.3.1.1.3	Beneficios energéticos del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	54
3.1.3.1.2	Iluminación natural.....	55
3.1.3.1.2.1	Evaluación del potencial de la iluminación natural.....	55
3.1.3.1.2.2	Aprovechamiento de la iluminación natural.....	60
3.1.3.1.2.3	Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural.....	61
3.1.3.1.3	Calentamiento solar de agua por termosifón.....	62
3.1.3.1.3.1	Utilización del calentador solar de agua por línea base.....	62
3.1.3.1.3.2	Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima.....	63
3.1.3.1.3.3	Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua.....	64
3.1.3.2	Aprovechamiento de la energía solar en forma activa.....	64
3.1.3.2.1	Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos).....	65
3.1.3.2.1.1	Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico.....	65
3.1.3.2.1.2	Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos.....	67
3.2	Balance de energía.....	67
3.2.1	Beneficios ambientales.....	68
4.0	Casos de estudio.....	69
4.1	Entorno con clima Templado: Texcoco, Estado de México.....	69
4.1.1	Información general.....	69
4.1.2	Diagnóstico.....	74
4.1.2.1	Estudio del bioclima.....	74
4.1.2.2	Radiación solar.....	80
4.1.2.2.1	Análisis de la incidencia solar.....	81
4.1.2.2.2	Evaluación del recurso solar: potencial.....	81
4.1.3	Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares.....	83
4.1.3.1	Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva.....	84
4.1.3.1.1	Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	84
4.1.3.1.1.1	Control solar.....	84
4.1.3.1.1.2	Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio.....	88
4.1.3.1.1.3	Beneficios energéticos del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	93
4.1.3.1.2	Iluminación natural.....	94
4.1.3.1.2.1	Evaluación del potencial de la iluminación natural.....	94
4.1.3.1.2.2	Aprovechamiento de la iluminación natural.....	97
4.1.3.1.2.3	Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural.....	100
4.1.3.1.3	Calentamiento solar de agua por termosifón.....	102
4.1.3.1.3.1	Utilización del calentador solar de agua por línea base.....	102
4.1.3.1.3.2	Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima.....	103
4.1.3.1.3.3	Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua.....	104
4.1.3.2	Aprovechamiento de la energía solar en forma activa.....	105
4.1.3.2.1	Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos).....	105
4.1.3.2.1.1	Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico.....	105
4.1.3.2.1.2	Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos.....	107
4.1.4	Balance de energía.....	108
4.1.4.1	Beneficios ambientales.....	111
4.2	Entorno con clima cálido seco: Ciudad Juárez, Chihuahua.....	111

4.2.1 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares.....	112
4.2.1.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva	112
4.2.1.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	112
4.2.1.1.1.1 Control solar.....	112
4.2.1.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio	113
4.2.1.1.1.3 Beneficios energéticos del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	114
4.2.1.1.2 Iluminación natural.....	115
4.2.1.1.2.1 Evaluación del potencial de la iluminación natural	115
4.2.1.1.2.2 Aprovechamiento de la iluminación natural.....	116
4.2.1.1.2.3 Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural	118
4.2.1.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón.....	118
4.2.1.1.3.1 Utilización del calentador solar de agua por línea base	118
4.2.1.1.3.2 Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima	119
4.2.1.1.3.3 Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua	119
4.2.1.2 Aprovechamiento de la energía solar en forma activa	120
4.2.1.2.1 Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos)	120
4.2.1.2.1.1 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico.....	120
4.2.1.2.1.2 Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos	122
4.2.2 Balance de energía.....	122
4.2.2.1 Beneficios ambientales	125
4.3 Entorno con clima cálido húmedo: Playa del Carmen, Quintana Roo	125
4.3.1 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares.....	125
4.3.1.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva	126
4.3.1.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	126
4.3.1.1.1.1 Control solar.....	126
4.3.1.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio	126
4.3.1.1.1.3 Beneficios energéticos del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	128
4.3.1.1.2 Iluminación natural.....	128
4.3.1.1.2.1 Evaluación del potencial de la iluminación natural	128
4.3.1.1.2.2 Aprovechamiento de la iluminación natural.....	130
4.3.1.1.2.3 Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural	131
4.3.1.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón.....	131
4.3.1.1.3.1 Utilización del calentador solar de agua por línea base	131
4.3.1.1.3.2 Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima.....	132
4.3.1.1.3.3 Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua	132
4.3.1.2 Aprovechamiento de la energía solar en forma activa	133
4.3.1.2.1 Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos)	133
4.3.1.2.1.1 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico.....	133
4.3.1.2.1.2 Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos.....	135
4.3.2 Balance de energía.....	135
4.3.2.1 Beneficios ambientales	138

5.0 Beneficios en los climas cálido seco, cálido húmedo y templado al definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios: energéticos, ambientales y económicos.....	139
5.1 Beneficios energéticos	140
5.1.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva.....	140
5.1.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente.....	140
5.1.1.2 Iluminación natural	142
5.1.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón.....	145
5.1.2 Aprovechamiento de la energía solar en forma activa.....	147
5.1.2.1 Sistemas Fotovoltaicos	147
5.1.3 Balance de energía general.....	148
5.2 Beneficios ambientales: Mitigación de CO ₂	151
5.3 Beneficios económicos.....	151
6. Conclusiones.....	155
Referencias	159

RESUMEN

Por la capacidad de generar energía con la radiación solar, la cual se considera como fuente renovable, se puede satisfacer gran parte de las necesidades energéticas del mundo actual, incluidos los requerimientos energéticos de los edificios, tema que se desarrolla en este trabajo.

La utilización de las energías renovables puede ser en forma activa o pasiva, aprovechamiento que difiere en utilizar o no algún tipo de tecnología.

El método propuesto parte de información del entorno, como temperatura del aire, humedad relativa, viento e irradiancia solar, así como información de los requerimientos energéticos de los edificios, del usuario e información geográfica, posteriormente se realiza un diagnóstico con dicha información, consiste en dos estudios: el del bioclima y el de disponibilidad y potencial del recurso solar, con base en los resultados de dichos estudios se proponen estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares aprovechando la energía solar en forma pasiva y activa, como el control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en la envolvente del edificio (control solar y materiales y sistemas constructivos adecuados), iluminación natural, calentador solar de agua, además de la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos. Consideradas las estrategias y recomendaciones anteriores en un caso de estudio, se realiza un balance energético, donde se resta la cantidad de energía generada mediante el aprovechamiento integral de la energía solar considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, a la demanda de energía que se requiere en el edificio del caso.

Como resultado se logra un nivel de sustentabilidad energética tipo Plus Energy en una vivienda de interés social en los climas más representativos de la República Mexicana (Bioclimas Cálido seco, Cálido húmedo y Templado). Para obtener un nivel Plus Energy en los 3 climas, se comparó la demanda energética considerando una línea eficiente de consumo energético con el aprovechamiento integral de la energía solar, los beneficios energéticos, ambientales y económicos dependieron de las características del clima y potencial solar del lugar.

Palabras clave: Energía solar, diseño bioclimático, integral, sustentabilidad energética, confort higrotérmico y edificios.

ABSTRACT

With the capability of the Sun to generate solar radiation, is considered as a renewable source that can meet much of current energy needs of the present world, including the energy needs of the buildings, topic that is develop in this article.

The use of renewable energy sources can be as active or passive way, take advantage that differs in use some kind of technology or do not use.

The proposed method is based on information from the environment such as the air temperature, relative humidity, wind and solar radiation, as well as information of the energetic requirements of the buildings, of the user and geographic (latitude, longitude and height), then performs a diagnosis with that information, consist in two studies: of the bioclimate and of the availability and potential of the solar resource, according to the information provided in these studies are proposed strategies of climate adaptation in construction and recommendations for the use of solar technologies taking advantage of solar energy in passive and active form, as the control of heat gains or losses by radiation, convection and conduction in the skin building (solar control and the selection of suitable materials and constructive systems), natural lighting, solar water heating, also of the generation of electricity with photovoltaic systems. Considered the previous strategies and recommendations in a study case, allows performed an energetic balance, where is subtracted the amount of energy generated by integrated use of solar energy understood since bioclimatic design, daylighting, thermal and photovoltaic technology, to the energy demand required in building of the selected case.

As result was achieved a level of energetic sustainability kind Plus Energy in a house of social interest in the climates more representative from Mexico (bioclimates warm dry, warm wet and tempered). To get a level Plus Energy in the 3 climates, was compared the energy demand considering an efficient line of energetic consumption against the use of solar energy in holistic form, them energetic, environmental and economic benefits, depended on of them features of the climate and solar potential of the place.

Keywords: Solar energy, bioclimatic design, integral, sustainability energetic, hygrothermal comfort and buildings.

INTRODUCCIÓN

Definición del problema:

En las naciones industriales, del 35% al 40% del total nacional del uso de energía primaria es consumida en edificios, una cifra que se aproxima al 50% cuando se toman en cuenta los costos energéticos de los materiales de construcción y de la infraestructura utilizados para los edificios¹, y, gran cantidad de la energía consumida en los edificios se utiliza para la climatización de espacios, iluminación y calentamiento de agua.

Existen diversos factores que impiden brindar una sensación de confort higrotérmico y un correcto aprovechamiento de la iluminación natural dentro de los edificios, puede ser por un diseño inadecuado, no va acorde al tipo de clima o región, como los materiales utilizados para construir, una orientación no favorable, tamaño de las ventanas, no contemplar la utilización de vegetación, etc. Asimismo, se utilizan fuentes convencionales y poco eficientes para satisfacer necesidades de calentamiento de agua y energía eléctrica en los edificios.

Entonces, para satisfacer la sensación de desconfort térmico, requerimientos lumínicos, de agua caliente y de energía eléctrica en los edificios, si se cuenta con los recursos económicos, se recurre a la utilización de energías no renovables. Se requiere un consumo elevado de los recursos no renovables para satisfacer las necesidades energéticas de los edificios, provocando una incertidumbre energética.

Objetivo general:

Desarrollar un método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios, considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica.

Objetivos particulares:

- ◆ Estimar el potencial pasivo del recurso solar por el control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en la envolvente (climatizar) y por un diseño lumínico considerando luz natural en los edificios según las particularidades específicas del clima.
- ◆ Cuantificar el nivel de sustentabilidad energética que ofrece el aprovechamiento de la energía solar.
- ◆ Medir los beneficios de mitigación de cambio climático mediante la reducción de gases de efecto invernadero como el Dióxido de Carbono (CO₂).

¹ White Paper: Transición hacia un futuro basado en las Fuentes Renovables de Energía, International Solar Energy Society, 2003.

- ◆ Elaborar un catálogo tecnología solar - beneficio.

Hipótesis:

Al definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios, considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, se puede lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable energéticamente o plus energy, además de provocar o conservar confort higrotérmico en los usuarios.

Justificación:

La energía consumida en los edificios generada con fuentes naturales no renovables provoca la emisión de una gran cantidad de gases de efecto invernadero al ambiente, asimismo, para la tercera década del siglo, en México habrá 45 millones de viviendas², igualmente incrementará la cifra de nuevos edificios en el mundo, lo que implica aumentos de emisiones de gases de efecto invernadero y un consumo desmesurado de recursos no renovables para satisfacer la demanda energética de los edificios nuevos y los existentes.

En el balance nacional de energía 2013³, el sector perteneciente al residencial, comercial y público representó el tercer lugar en cuanto a uso total de la energía a nivel nacional con el 17.72%, donde gran cantidad de esa energía es consumida en el sector residencial, al cual pertenece la vivienda de interés social, su consumo energético por gas licuado fue de 256.96 petajoules, el de la leña fue de 255.42 petajoules y de 191.14 petajoules en electricidad.

Los diseños integrados de inmuebles de “respuesta climática” mediante métodos de diseño de edificios completos, permiten un mayor ahorro en costos en la construcción actual, y normalmente hay una mejoría del 30 al 50% en la eficiencia energética de los nuevos edificios, con un aumento de menos de 2% en los costos de construcción, y en ocasiones, sin costos adicionales⁴. Debido a ello la importancia de buscar alternativas para satisfacer las necesidades energéticas y de confort en los edificios, mediante fuentes renovables como la energía solar que de manera conjunta con otros tipos de fuentes de energías limpias brinden una seguridad energética y mitiguen gases de efecto invernadero causantes del cambio climático.

Sin embargo, aunque existen metas para la transición de fuentes de energía convencional por fuentes de energía renovable para la generación de energía, se

² Criterios e indicadores para desarrollos habitacionales sustentables 2008.

³ Balance nacional de energía, SENER, 2013.

⁴ White Paper: Transición hacia un futuro basado en las Fuentes Renovables de Energía, International Solar Energy Society, 2003.

requieren mayores esfuerzos y mejores estrategias para acelerar dicha transición no solo en el sector eléctrico. Los edificios son responsables del 40% de la energía demandada y de 36% de las emisiones de CO₂⁵, por tal motivo, son un nicho importante a considerar para implementar medidas de eficiencia energética como puede ser al utilizar la energía solar.

Estructura y contenido:

El documento se estructura en seis capítulos. En el primer capítulo se presenta el estado actual de las investigaciones, programas, normas y asociaciones concernientes al aprovechamiento de la energía solar considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, así como de la eficiencia energética en las edificaciones residenciales. En el marco teórico, se describen las definiciones, características y elementos referentes al sector residencial y al recurso solar, así como de sus principales formas de aprovechamiento (diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica).

En el tercer capítulo se desarrolla un método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica en los edificios. Posteriormente se valida el método en tres ciudades con los climas más representativos de México: cálido seco, cálido húmedo y templado.

Para cada caso de estudio se analiza una línea de consumo energético así como se realiza un diagnóstico, posteriormente se proponen estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares, se dividieron por tipo de aprovechamiento de la energía solar: en forma pasiva con la utilización de calentadores solares de agua, iluminación natural, materiales de construcción adecuados y control solar, y en forma activa con la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos. Al final de cada caso de estudio se realizó un balance de energía entre la demanda de energía y la energía generada y ahorrada por el uso de la energía solar. Adicionalmente se cuantifican los beneficios ambientales por la mitigación de CO₂ para cada caso de estudio comparado con la emisión de CO₂ en una vivienda convencional, asimismo se muestran los beneficios económicos que se obtienen.

Finalmente, después de realizar un análisis de los resultados obtenidos en los casos de estudio, se presentan las conclusiones que evidencian los múltiples beneficios obtenidos al definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios.

⁵ Green Building Research, US Green Building Council, USGBC, EUA, 2010.

1.0 Antecedentes

En este capítulo se presenta el estado actual de las aplicaciones y metodologías referentes al uso de la energía solar en edificios residenciales. Igualmente se realiza una síntesis de lo realizado en México concerniente a asociaciones, normas y programas, que estimulan y regulan el aprovechamiento de la energía solar en la vivienda.

1.1 Metodologías para aprovechar la energía solar en los edificios

Las metodologías desarrolladas para la utilización de la energía solar, correspondientes a algunas de sus principales formas de aprovechamiento que se clasifican en diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica se encuentran disponibles en gran cantidad de estudios pero integrando solo una o máximo tres formas de aprovechamiento de la energía solar, algunas de las metodologías citadas en este apartado serán punto de partida para el desarrollo de este trabajo.

La iluminación natural es un recurso disponible en prácticamente cualquier parte del mundo durante horas diurnas, inclusive en días nublados y lluviosos, aunque para aprovechar la iluminación natural de forma correcta según los requerimientos de iluminación de los edificios deben tomarse en cuenta una gran cantidad de variables para un correcto diseño de su utilización en interiores y exteriores, por ello (Robbins et al., 1984) construyen un modelo con el objetivo de obtener una predicción horaria y mensual de la disponibilidad de la iluminación natural. Se pueden estimar los valores de iluminancia exterior en superficies inclinadas en cualquier orientación.

(Pérez et al., 1990) elaboran un modelo que considera brillo del cielo, vapor de agua contenida en la atmósfera y la turbulencia atmosférica. Este modelo fue calculado experimentalmente tomando como base los datos de irradiancia e iluminancia horaria. Se realizaron mediciones hasta de tres años en partes de Norteamérica y Europa, se obtuvieron buenos resultados en cuanto a iluminancia global y difusa.

Para la correcta estimación de los niveles de iluminación natural en superficies exteriores e interiores, es necesario conocer la cantidad de irradiación incidente en superficies horizontales e inclinadas. (Almanza & Estrada, 2005) Desarrollaron un modelo para estimar los niveles de irradiación global, directa y difusa, para superficies inclinadas y horizontales, utilizan algunos de los modelos de mayor aceptación internacional, utilizan datos de fácil acceso como número de días lluviosos, latitud, humedad relativa y ubicación del lugar respecto al mar.

Proporcionan una gran variedad de mapas de isohelias de la República Mexicana para la irradiación global, directa y difusa en superficies inclinadas y horizontales, para cada mes del año, además de desarrollar un software con los datos obtenidos de este atlas llamado Solartronic, se utiliza este software debido a la fiabilidad de sus datos para el cálculo de la irradiación incidente en superficies horizontales e inclinadas, en este caso será para estimar la cantidad del recurso solar de una región.

(Preciado y Morillón, 2010) interrelacionan metodologías para evaluar el potencial de la iluminación natural y su aprovechamiento en los edificios, parten del cálculo de las eficacias luminosas e iluminancias exteriores en superficies verticales y horizontales en su componente global y difusa mediante reconocidos modelos matemáticos, para posteriormente indicar mediante una metodología cuando aprovechar la iluminación natural en los edificios de forma directa o de forma indirecta, el aprovechamiento de la iluminancia en forma directa se propone para momentos en los que se presenta frío según un diagrama de isorequerimientos que indica las sensaciones horaria de frío, calor y confort en el lugar de estudio, y aprovechar la iluminancia indirecta en momentos de calor y confort para evitar ganancias adicionales de calor en el edificio, ambas formas de aprovechamiento se proponen en horas en las que se cuenta con el recurso solar. Un año más tarde presentan un trabajo de tesis de maestría con el título de Potencial de la iluminación natural en México, donde llevan a cabo la estimación para 131 ciudades, una proyección geográfica nacional de la iluminancia global promedio mensual en tres diferentes horarios, además de desarrollar un software llamado BIOSOL, que entre otras aplicaciones proporciona datos de iluminación natural exterior y eficacia luminosa, así como datos de control solar para la construcción de aleros y partesoles con el ángulo óptimo para aprovechar o evitar las ganancias solares.

Las ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies opacas y transparentes de los edificios en algunas estaciones del año, pueden considerarse como responsables del mayor consumo de energía en los edificios debido al uso del aire acondicionado para satisfacer las necesidades de confort térmico de los usuarios, así de importante el aprovechamiento de la energía del sol para calentar en invierno. Mediante el control solar se pueden llegar a satisfacer parte de estas dos necesidades de aprovechar o evitar las ganancias solares de radiación solar, como en el caso de (Olgay y Olgay, 1957) que desarrollaron un método para calcular protecciones solares, en la primera etapa de su método estimaban la cantidad de tiempo requerido de sombras, requerían datos de temperatura horaria además debían conocer la temperatura neutra o también conocida como de confort. Posteriormente mediante

nomogramas calculaban el sobrecalentamiento, procesaban esos datos en una gráfica solar en donde colocaban perfiles de sombra para elementos horizontales, verticales y combinados. Con su trabajo es posible calcular los elementos mencionados para el 50 y 100% de sombra, con la limitante de que solo evaluaron las horas en que los elementos reciben la radiación, con base en horas de sobrecalentamiento.

(Gómez, 1991) expone un método en el cual se diseñan y calculan diversos elementos de protección solar, se calculan con 100% de sombra para el estado de Colima, obteniendo los ángulos óptimos y eficiencias que tienen para los dos semestres. Este método es retomado por (Mejía y Morillón, 1999) para calcular las protecciones solares horizontales aplicados a la ciudad de la Paz, elaborando dicho cálculo para las principales orientaciones.

(Mejía y Morillón, 2004) realizan un modelo de diseño y evaluación del control solar en edificios, en principio se elabora un estudio del bioclima de la región, las gráficas solares estereográficas para los dos semestre del año, adaptadas al lugar a analizar y las mascarillas de sombreado para sobreponerlas en las gráficas solares, lo siguiente es calcular las protecciones solares, se cuantifican en horas los datos proporcionados por el diagrama de isorrequerimientos como es frío, calor y confort, de esta forma se pueden conocer las horas que se requiere soleamiento o protección solar para ambos semestres, esa información se procesa en las gráficas solares por semestre sombreado las horas requeridas con protección solar, posteriormente al sobreponer las mascarillas sobre las gráficas semestrales con un ángulo de 0° , se contabiliza el tiempo requerido de sombra que queda fuera de la protección solar del alero y las que requieren soleamiento. Este método permite conocer el ángulo óptimo de las protecciones solares para ambos semestres, disminuyendo las ganancias de calor en verano y permitiendo el paso de la radiación solar en invierno.

Las ganancias solares directas pueden utilizarse para aprovecharse pasivamente en las edificaciones, por consiguiente, (Mesa y Morillón, 2010) desarrollan metodologías para evaluar el potencial y aprovechamiento pasivo de la energía solar en entornos urbanos, tomando como caso de estudio la ciudad de Mendoza, Argentina, a través de un modelo gráfico computacional que permite calcular las áreas de las fachadas asoleadas en secciones normales a la dirección de los rayos solares incidentes sobre las mismas, para cualquier hora y día del año, calculan las superficies potencialmente captadoras del edificio, este modelo es comparado con un método analítico con una variación de resultado de 0.0002% entre el modelo gráfico y el método analítico, otra metodología que utilizan es el cálculo de una magnitud de cada componente de la irradiación solar incidente directa, difusa y reflejada. Establecen la estrecha relación que existe entre la

morfología urbana con el posible aprovechamiento pasivo de la energía solar, para cubrir las necesidades en los entornos urbanos según el clima de la región, con valores de hasta el 80% en el aspecto térmico y 100% en lumínico de ahorro energético, además de cubrir el 100% de CSA.

Más tarde (Morillón et al., 2011) realizan un estudio sobre los materiales y sistemas constructivos comúnmente utilizados en los techos y muros de la vivienda en México, mostrando que en bioclimas como el cálido seco extremo no se cumpliría con las normativas existentes para construcción de viviendas en México, a menos que se cuente con aislamiento en techos y muros, tomando gran relevancia la selección adecuada de materiales de construcción y sistemas constructivos para racionalizar el uso de sistemas de climatización activo.

Asimismo, la utilización de calentadores solares de agua ha ganado terreno en sectores como el residencial en sustitución de equipos que funcionan con gas, debido a esto, (Ramos y Patiño, 2006) realizan un método para el dimensionamiento, selección y beneficios del uso de calentadores solares de agua CSA en el sector doméstico en México, primeramente se debe calcular el volumen de agua caliente a utilizar por día así como la temperatura deseada proveniente de los CSA, la cantidad de personas en la vivienda así como sus edades y tener un estudio del clima del lugar, posteriormente en colaboración de Petróleos de México (PEMEX), utilizando datos de un estudio realizado por el Instituto Mexicano del Petróleo para conocer el consumo del gas para usos finales del sector doméstico de la ciudad de México, se estimaron los ahorros energéticos y el dimensionamiento del colector solar mediante un modelo matemático, además de mostrar en cuanto tiempo se puede recuperar la inversión de un equipo de CSA aplicado a una vivienda.

(Rosas y Morillón, 2009), desarrollan una metodología para conocer los beneficios económicos, ambientales y energéticos que supondría la sustitución de calentadores de agua por calentadores solares planos con cubierta, se toman en cuenta 9 regiones climáticas de México, se cuantifica el número de calentadores de gas en los hogares mexicanos para el año 2006, y se determina el potencial de ahorro basándose principalmente en la irradiación solar disponible en cada región. Se muestran los beneficios económicos, ambientales y energéticos, que supone el cambio de tecnología convencional por renovable en cuanto al calentamiento de agua sanitaria se refiere, aunque su estudio se limita al aprovechamiento térmico para CSA.

1.1.1 Estudios de aplicaciones de la energía solar en los edificios residenciales

Se realiza una revisión de los estudios y avances desarrollados en materia de aplicaciones de la energía solar en edificios residenciales, dentro del mismo apartado se muestran estudios en los que se consideren hasta dos tipos del uso de la energía solar que comprenden el diseño bioclimático, tecnología solar térmica y solar fotovoltaica.

En 1939, se construyó la MIT Solar House I, ubicada en el Campus del Instituto Tecnológico de Massachusetts, EUA. La casa incluía una gran área en su techo para captar la radiación solar como fuente de calor en el invierno además de un sistema de almacenamiento de agua.

En 1955, la Bliss House en Tucson, Arizona, incorpora colectores solares de aire y muros masivos de roca con alta inercia térmica para el aislamiento del exterior.

(Arias et al., 1967) edifican la primera casa autosustentable en el Estado de México, proyecto nombrado como Xochilcalli. Para la generación de su propia energía se contaba con un equipo de captación y almacenamiento de agua, un biodigestor generador de gas y electricidad, de un CSA. Además se pusieron en marcha sistemas de generación de electricidad por SFV, aerogenerador y generador hidroeléctrico, marcando así el inicio del país en materia de vivienda sustentable. Se cumplió con la generación de energía para alcanzar la sustentabilidad energética mediante el aprovechamiento del recurso solar, del viento, hidroeléctrica y por biomasa.

En los años 70, Everardo Hernández trabajaba sobre la factibilidad del aprovechamiento en México de la energía solar, para satisfacer requerimientos habitacionales, preocupado principalmente por la climatización pasiva de viviendas de interés social, algunos de sus proyectos se llevaron a cabo en varias partes de la República Mexicana, aunque solo enfocándose en el aprovechamiento de la energía solar, para esa misma década la Dirección General de Ecología Urbana de la SAHOP presenta un proyecto demostrativo sobre ecotecnias para los asentamientos humanos en el trópico húmedo de México. El estudio se basa en el uso de tierra en muros como sistema de termorregulación, se desarrollaban distintos proyectos para climatizar pasivamente, por medio de la creación de tres viviendas prototipo ubicadas en San Luis Potosí, La Paz, B.C. y Chihuahua.

En 1979, se construye la Saskatchewan Conservation House, en Regina provincia de Saskatchewan, Canadá, considerada como uno de los ejemplos pioneros en eficiencia energética en Norte América, implementando sistemas pasivos de climatización y un sistema de calefacción por medio del intercambio de aire caliente calentado por la misma casa.

A comienzos de la década de los 80, Fritche y Zapata trabajan sobre la tecnología y la vivienda autosuficiente utilizando diversos factores como el clima, los materiales y la tecnología para lograr la habitabilidad de los espacios. Por su parte, los ingenieros José Luis Alcalá y Enrique Flores de la Universidad de Guadalajara, experimentan con la climatización pasiva de edificios en el valle de Atemajac, mediante el diseño, construcción y monitoreo de una vivienda. Becerril (1980) en Toluca, trabaja sobre los niveles de asoleamiento en la arquitectura, mientras los ingenieros Rodríguez y Palacios, del IIUNAM, desarrollan herramientas para obtener la temperatura ambiente instantánea ante los problemas de la falta de información disponible. Ese mismo año la Universidad de Baja California, establece la Maestría en Arquitectura Solar, ligando sus actividades con investigadores como Baruch Givoni. Un años más tarde, Armando Deffis, de la Escuela Nacional de Arquitectura de la UNAM, organiza el primer seminario en México sobre ecotecnia para la vivienda. Reyne Mel, también de la UNAM, realiza trabajos de capacitación y publicación sobre diseño bioclimático. Cárdenas, del Instituto de Investigación de Materiales de la UNAM, trabaja sobre energía solar y planeación del desarrollo urbano, arquitectónico y diseño.

(Lodhi, 1994) realiza un análisis en el que propone distintas estrategias para el futuro cercano en relación con el aprovechamiento híbrido de los SFV, térmico solar y el uso de hidrógeno en las edificaciones. Una de ellas a través de la producción en masa, otra consiste en unir la tecnología de energía solar FV con la tecnología termosolar. Además del uso de hidrógeno, una como portador de energía para el almacenamiento y el otro como un combustible limpio para reemplazar combustibles fósiles. Su estudio realizó una correcta guía para lo que se ha venido desarrollando, sobre sistemas híbridos de energía solar fotovoltaica, solar térmico y de hidrógeno.

(Mueller y Kleine, 2003) mediante un proyecto para beneficiar a dos pueblos en Jujuy, Argentina, es puesto en práctica el concepto de manejo integrado de tecnologías solares térmicas, con aplicaciones en calefacción y agua caliente, para un clima extremoso que puede variar hasta 30°C entre el día y la noche, simulan la energía para calefacción y cantidad de agua necesaria para cada edificio, utilizando el concepto de losa radiante para la climatización y colectores solares para generar agua caliente sanitaria. Su trabajo se limita a la integración de dos aplicaciones para aprovechar la energía solar, la climatización y CSA.

La Comisión Nacional de Fomento a la Vivienda (CONAFOVI, 2006), actualmente CONAVI, publica la primera edición de la Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda, recopilando diversos estudios de arquitectura bioclimática llevados a cabo por investigadores nacionales e internacionales. Toma como herramienta para la clasificación de regiones bioclimáticas y ubicación de proyectos, el Atlas del Bioclima de México (Morillón, 2004). La guía brinda recomendaciones bioclimáticas para el diseño urbano y arquitectónico con base en los conceptos básicos de confort de la vivienda, así como estrategias para la climatización pasiva por región, con el objetivo central de que el ahorro de energía sea planteado desde el diseño mismo con base en la arquitectura bioclimática.

Más adelante (Morillón, 2007) presenta el trabajo Habitabilidad térmica de una vivienda, donde se realiza una evaluación térmica de los materiales de uso común en la construcción en las viviendas de México, además se lleva a cabo una simulación del comportamiento térmico de una vivienda de interés social con dichos materiales, en cuatro ciudades con diferentes condiciones climáticas, asimismo, se realizó el monitoreo térmico de una vivienda construida en Hermosillo, con materiales como el concreto celular y el block hueco.

(Moldovan et al., 2011) proponen para una “Casa Solar” ubicada en Rumania, abastecida 50% por energía geotérmica y 50% con energías no renovables, un método para conocer la óptima superficie de los módulos fotovoltaicos para poder suministrar el 100% de la energía a la casa con energías renovables y así poder lograr el consumo de energía cero, ayudados de seguidores solares y aprovechar la relación entre la energía que se puede producir en el sitio y la energía demandada. Su estudio considera la generación de electricidad por SFV y geotermia, se puede llegar a abastecer por generación eléctrica todo el complejo, pero no consideran la energía térmica solar.

Actualmente ya se cuenta con una vasta cantidad de construcciones que integran la energía solar en las viviendas y edificios como es el caso de (Kyoung et al., 2014) en el campus del Instituto de Investigación de Corea, se instalaron 25 m² de colectores solares, 30 m² de módulos fotovoltaicos y una bomba de calor formando un sistema híbrido, para medir el rendimiento de estos sistemas de energía solar se siguieron los siguientes índices de rendimiento: promedio mensual de eficiencia del colector de sistema solar de calentamiento, fracción solar anual del sistema de calentamiento solar y el promedio mensual de eficiencia del sistema fotovoltaico. La eficiencia para los colectores solares instalados verticalmente en el edificio fue de 23.8% y de 10.9% para los SFV, mostrando que los índices de eficiencia son menores a los previstos lo que supone una mala orientación de sus sistemas de generación de electricidad y de colectores solares.

(Tsalikis et al., 2015) realizan una serie de simulaciones para conocer la opción más viable en cuanto a la selección de equipos de CSA y de SFV, para cubrir las necesidades energéticas de las viviendas, de los cuatro climas representativos de Grecia. Para su análisis se toman datos estadísticos de la cantidad de agua caliente necesaria diaria por persona así como de la energía eléctrica consumida anualmente en promedio en los hogares de ese país. La propuesta considera que se puede llegar a alcanzar una sustentabilidad energética, no consideran la climatización pasiva ni la iluminación natural.

1.2 Los edificios energéticamente sustentables

El concepto de un edificio energéticamente sustentable o Net Zero Energy, se basa en distintos aspectos que deben considerarse desde el diseño mismo del edificio además de utilizar tecnología eficiente hasta la generación de energía que puede obtenerse al utilizar fuentes renovables aprovechadas de forma pasiva o activa, con la finalidad de producir la misma energía demandada por los edificios en condiciones normales de funcionamiento bajo una línea base de consumo final de energía, generalmente medida a lo largo de un año, con la posibilidad de que adicional al Net Zero Energy se genere más energía de la necesaria para el funcionamiento del edificio concepto conocido como Plus Energy.

Canada Mortgage and Housing Corporation (CMHC, 2006), en colaboración conjunta con Natural Resources Canada (NRCan), lanzan la iniciativa de proyectos de demostración EQuilibrium Housing, con el objetivo de que los sectores privado y público desarrollen casas que combinen recursos y tecnologías de eficiencia energética para así reducir su impacto ambiental. Como resultado, un total de 72 equipos presentaron proyectos en julio de 2006, de los cuales doce equipos recibieron fondos del CMHC.

(Vieira, 2006) propone mediante una pirámide de política energética diversos aspectos que deben emplearse para reducir el uso de la energía, en su pirámide plantea estrategias con diferentes grados de importancia para lograr una edificación autosustentable teniendo como base el diseño del mismo, ese mismo año (Torcellini et al., 2006) realizan mediante el trabajo Zero Energy Buildings: a critical look at the definition, un análisis de diversas edificaciones que son consideradas como Zero Energy, y definen cuatro principales formas en que puede ser clasificado el termino Zero Energy y dependiendo del objetivo que se desee lograr como costos, emisiones, fuentes y del lugar será la forma en que los edificios son diseñados para lograr su objetivo.

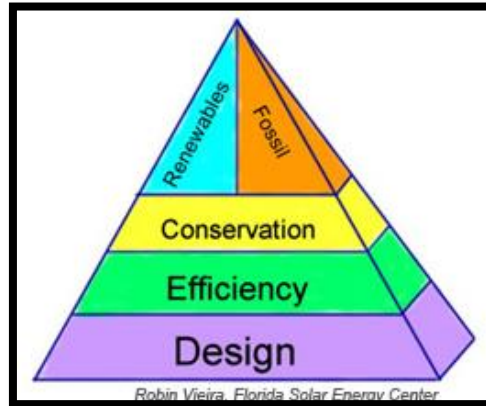


Figura 1.1 The energy policy pyramid

En 2006, es desarrollado un proyecto piloto de La vivienda Sustentable, donde es considerada la construcción de 5000 viviendas por parte de la CONAVI a través del Instituto de Ingeniería, UNAM, incorporando la iniciativa privada con constructoras como URBI, PULTE, BRACSA y los institutos estatales de vivienda de Nuevo León y Tamaulipas, en ciudades como Monterrey, Mexicali, Querétaro, Hermosillo, Nuevo Laredo y Acapulco. Un año después, (Morillón, 2007) elabora un estudio con las Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable, en el cual se establecen las especificaciones y recomendaciones técnicas de las tecnologías enfocadas al ahorro de energía eléctrica, gas y agua, con el fin de estimar los beneficios energéticos por el uso de estas mismas. Ese trabajo fue base para la publicación en el mismo año de la Guía metodológica para el uso de tecnologías para el ahorro de energía y agua en la vivienda de interés social en México, herramienta fundamental para los desarrolladores de proyectos, inmobiliarias, autoridades del sector y usuarios finales de la vivienda.

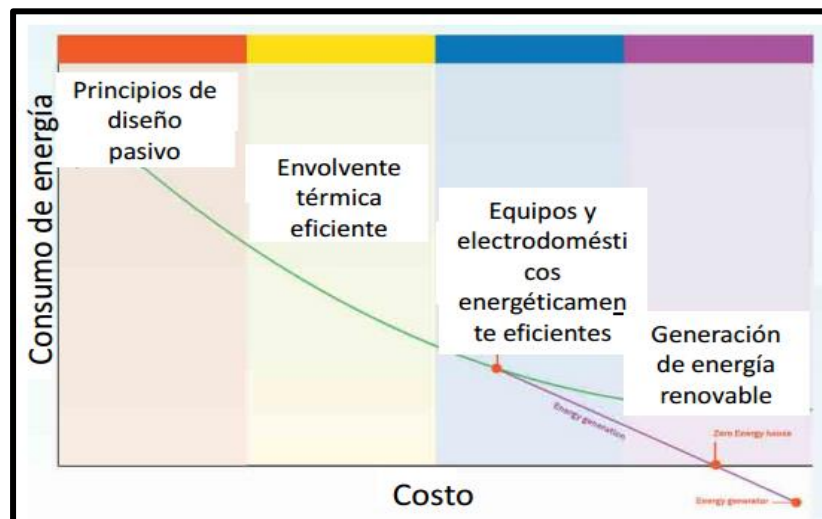
Estados Unidos de América, en 2007 adopta una medida similar al Reino Unido mediante The Energy Independence and Security Act of 2007 (EISA 2007) donde autoriza The Net Zero Energy Commercial Building initiative, con el objetivo de apoyar la meta para que todos los edificios comerciales nuevos al año 2030 alcancen el grado de Net Zero Energy, además de metas a largo plazo que para al 2040 el 50% de los edificios comerciales de EUA cuenten con las características de Zero Energy y al 2050 todos los edificios comerciales sin ninguna excepción estén dentro de esta clasificación.

Fue creado un foro en Alemania en 2008, para debatir temas relacionados con los Zero Energy Building, con la iniciativa de un grupo de trabajo dentro de la Agencia Internacional de Energía (IEA) titulado Towards Net Zero Energy Solar Buildings, IEA SHC/ECBCS Project Factsheet, Task 40/Annex 52, el cual tiene el objetivo de estudiar edificios Net-Zero, Near Net Zero y edificios de baja energía con el fin de

desarrollar un entendimiento común en el marco de convenir las definiciones internacionales, las herramientas y soluciones innovadoras de la industria. Para lograr este objetivo se publicó el Task 40/Annex 52, el cual documenta proyectos de demostración de práctica de Net ZEB que sean convincentes en calidad arquitectónica.

Además, se debe de considerar una de las etapas imprescindibles para lograr la sustentabilidad energética, la cual es, elaborar un correcto análisis en la línea base de consumo energético y sus principales usos finales en los edificios, para establecer las medidas de ahorro que pueden ser implementadas, (Morillón, 2009) presenta un estudio donde determina la línea base de consumo de energía eléctrica y de consumo de gas por calentamiento de agua en las viviendas para algunas ciudades representativas de México.

En 2011 en el XIX Congreso Internacional Ambiental, mediante la conferencia Casas Cero Energía (ZEH) Tecnologías verdes en la vivienda de interés social en México, expuesta por Arturo Echeverría muestra una metodología a seguir para tener casas que produzcan la misma energía que consumen, sean altamente eficientes, hagan uso de energías renovables, para lograr estos objetivos de deben considerar algunos criterios de sustentabilidad como el uso de calentadores solares, sistemas fotovoltaicos, aislamiento térmico, aparatos electrónicos eficientes y un diseño bioclimático (Gráfica 1.1), mejorando el confort del usuario y la reducción del uso de gas, agua y electricidad, aunque no plantea sistemas específicos ni muestra resultados donde se alcance la sustentabilidad energética, así como solo se proponen solo dos formas de aprovechamiento de la energía solar: térmica y fotovoltaica.



Gráfica 1.1 Consumo de energía Vs costo propuesto para tener una casa cero energía, 80% eficiencia y 20% generación con energía renovable

Es presentada una metodología para el proyecto Zero Energy Home Real Ibiza, Cancún de la empresa VINTE (2011), la cual se basa en cuatro etapas: diagnóstico bioclimático, mejora de las técnicas de climatización pasiva, sistemas fotovoltaicos diseñados con base en las mejoras de las técnicas de climatización pasiva y consumo eficiente de energía. Se menciona la realización de un diagnóstico bioclimático, así como la incorporación de sistemas pasivos de climatización, sin embargo, no menciona el criterio para la selección de los sistemas pasivos utilizados en el diseño.

(Sartori, et. al., 2012), publican Net Zero Energy Buildings: A Consistent definition framework, este trabajo hace referencia al marco teórico y conceptual sobre los Zero Energy Building. En él se reconoce que diferentes definiciones son posibles dependiendo las políticas o metas de cada país o región, las cuales giran en torno al concepto del balance energético, definiendo dos tipos de balances -importación/exportación y demanda/generación-, siendo necesario tomar en cuenta la interacción del mismo edificio con la red general de energía.

Ese mismo año (Ceballos y Morillón, 2012), presentan una metodología para lograr la sustentabilidad energética en una vivienda, donde consideran el aprovechamiento de la energía solar en forma térmica y fotovoltaica, el estudio expone la factibilidad que tiene lograr una vivienda de tipo net zero energy en los tres bioclimas representativos de México, cálido-húmedo, cálido-seco y templado, mostrando la importancia del correcto diseño bioclimático para lograr la sustentabilidad energética, y aunque el clima templado es el más factible para lograr la vivienda net zero energy no es el que mayor ahorro puede provocar sino que el clima cálido-seco puede inclusive llegar a ser plus energy esto porque además de autosatisfacer sus necesidades energéticas tiene excedentes de energía que pueden inyectarse a la red eléctrica nacional, el estudio además muestra medidas para el uso de CSA ayudado de tecnología eficiente.

(Polanco J. y Yousif C., 2015), mediante el trabajo Prioritising energy efficiency measures to achieve a Zero Net-Energy hotel on the island of Gozo in the central Mediterranean, incorporan medidas de eficiencia energética y uso de la energía solar para alcanzar el nivel de sustentabilidad tipo NZE mediante la introducción de sistemas de iluminación natural y LED, bombas de calor solares, sistemas fotovoltaicas, y selección de materiales adecuados, realizando una simulación del comportamiento del edificio mediante el software Polysun, comportándose como un edificio de clasificación A, sin embargo, no especifican el criterio de selección y dimensionamiento de la tecnología solar y materiales de construcción utilizados para lograrlo.

1.3 Programas, normas y asociaciones en México concernientes a la eficiencia energética y utilización de la energía solar en los edificios residenciales

La Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) se constituyó oficialmente durante la IV Reunión Nacional de Energía Solar, celebrada en San Luis Potosí, S.L.P., el año de 1980, auspiciada por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, la ANES es una asociación que marca la pauta en cuanto a investigaciones en materia de energías renovables en México se refiere, con principal énfasis en el aprovechamiento de la energía solar.

El aprovechamiento de los sistemas fotovoltaicos SFV para generación de electricidad y el calentamiento solar de agua CSA, comenzaron a tomar relevancia a partir de la primera y segunda crisis petrolera que se vivió a escala mundial en los años de 1973 y 1981 respectivamente, causadas por la reducción del precio por barril de petróleo, entre otros factores, causando un gran interés la generación de energía por SFV y CSA, aunque la elevada inversión para su construcción es una de las mayores limitantes para la utilización de estos sistemas.

En 1990 se crea el Fideicomiso N. 728, Fideicomiso para la constitución de un fondo resolvente de financiamiento para el programa de aislamiento térmico de la vivienda (FIPATERM), respaldado por instituciones como la Comisión Federal de Electricidad (CFE), se origina por la presión política de usuarios en zonas de clima cálido extremoso, inicialmente se aplica para la ciudad de Mexicali, B.C. Este programa apoya el aislamiento térmico en techos de las viviendas, con un ahorro estimado de 30%, por la reducción de uso de sistemas de climatización.

El programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México (Procalsol) es una iniciativa de la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, en colaboración con la Asociación Nacional de Energía Solar (ANES) y la Agencia Alemana de Cooperación Técnica (GIZ, por sus siglas en alemán), para el apoyo a acciones que en México se desarrollan para fomentar y ampliar el uso de los calentadores solares. Los sectores para aprovechar la energía solar mediante el calentamiento solar del agua apoyados por este programa son la vivienda, la industria, comercio y agronegocios, teniendo como meta global para el 2012, una capacidad instalada de 1, 800, 000 m² de superficie cubierta por calentadores solares de agua, por otro lado en 2008 se publicó en el Diario Oficial de la Federación la NMX-ES-003-NORMEX-2007, que establece los requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos, para calentamiento solar de agua, aunque es una norma voluntaria ayuda a promover tecnología más eficiente y contribuye a proteger al consumidor.

En julio de 2007 el organismo regulador del sector de gas y electricidad en México Comisión Reguladora de Energía (CRE), aprobó una resolución que ofrece a los inversionistas la posibilidad de instalar sistemas fotovoltaicos conectados a la red nacional en pequeña escala, con hasta 10 kW para hogares y 30kW para empresas.

La Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía en 2009, asistida por la Cooperación Técnica Alemana, elaboraron un trabajo titulado “Nichos de mercado para sistemas fotovoltaicos en conexión a la red eléctrica en México”, con el objetivo de identificar nichos de mercado para un uso financieramente viable de sistemas fotovoltaicos en el sector residencial en México, así como en los sectores industrial y de servicios. Para el sector residencial se llevó a cabo un estudio para 29 ciudades, consideraron dos posibles panoramas, el primero es un sistema fotovoltaico, diseñado para suministrar el total del consumo anual de energía eléctrica del hogar y el segundo panorama, un sistema diseñado para suministrar sólo la cantidad de energía eléctrica necesaria, a fin de cambiar a una tarifa de menor precio. Este trabajo calcula la generación de beneficios económicos y nichos por el uso de SFV en el sector residencial, comercial y de servicios.

Ese mismo año, se publica la Norma NMX-C-460-ONNCE-2009, Industria de la construcción – Aislamiento térmico- Valor R para envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana–Especificaciones y verificación, la cual establece las especificaciones que deben cumplir las viviendas a través de su envolvente con el fin de disminuir la demanda energética para estar acondicionadas térmicamente y mejorar las condiciones de habitabilidad en su interior.

Para el año 2010 el Instituto de Fondo Nacional de la Vivienda para los Trabajadores (Infonavit), creó un programa nombrado Hipoteca Verde, considerando dentro del esquema de hipoteca verde aquellas viviendas que incluyan atributos de sustentabilidad como un diseño bioclimático y/o tecnologías que generen ahorro en el consumo de energía eléctrica, agua y gas, se ha consolidado este programa como el más importante llevado a cabo a nivel nacional en cuanto a vivienda sustentable se refiere, promoviendo el diseño bioclimático y el aprovechamiento de energías renovables como la solar.

En 2011 la Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía (CONUEE), en conjunto con otras instituciones dedicadas al correcto y eficiente uso de la energía, publica en el Diario Oficial de la Federación, la NOM_020_ENER_2011, norma mexicana que establece lo siguiente: “Eficiencia energética en edificaciones.- envolvente en edificios para uso residencial”, con el objetivo de limitar la ganancia

de calor de los edificios para uso habitacional a través de su envolvente, además de racionalizar el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento.

1.4 Conclusiones

Las aplicaciones, metodologías y avances desarrollados en México y resto del mundo, que se muestran en la revisión bibliográfica, acerca de la utilización de la energía solar en edificaciones, se encuentra disponible para una o hasta tres formas de aprovechamiento, “donde la tecnología fotovoltaica solar, en concierto con la eficiencia energética y el diseño sustentable de edificios e integrada a la red eléctrica, puede hacer una contribución sustancial a las necesidades energéticas de casi todos los países del mundo”⁶.

A nivel mundial se presenta un vasto potencial del recurso solar para utilizarse mediante el calentamiento solar de agua, generación de energía por SFV, altos niveles de iluminancia natural exterior para superficies horizontales y verticales, ayudado de una selección apropiada de los sistemas y materiales constructivos y medidas de control solar en los edificios, se contribuye a lograr una seguridad energética al dejar de utilizar energía eléctrica y térmica abastecida con fuentes convencionales, que a su vez se deriva en mitigación de gases de efecto invernadero.

En este trabajo se propone un método donde se define requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios, mostrando múltiples beneficios logrados en cada bioclima como el nivel de sustentabilidad energética que puede ser de tipo eficiente, sustentable energéticamente o plus energy, así como provocar o conservar confort higrotérmico en los usuarios.

⁶ White Paper: Transición hacia un futuro basado en las Fuentes Renovables de Energía, International Solar Energy Society, 2003.

2.0 El sector residencial y el recurso solar

2.1 Sector residencial

2.1.1 Uso de la energía en el sector residencial

En 2011, cerca del 23% del consumo final de energía global fue utilizado en el sector residencial. Mientras que el porcentaje del consumo de energía final total a nivel residencial se mantuvo estable entre 1990 y 2011 (Figura 2.1), el consumo de energía total residencial aumentó un 35% como resultado de un amplio número de factores, incluyendo el aumento de población y el número de viviendas ocupadas, cambios en el tamaño de las viviendas, el aumento de equipamiento, y la mejora del bienestar⁷.

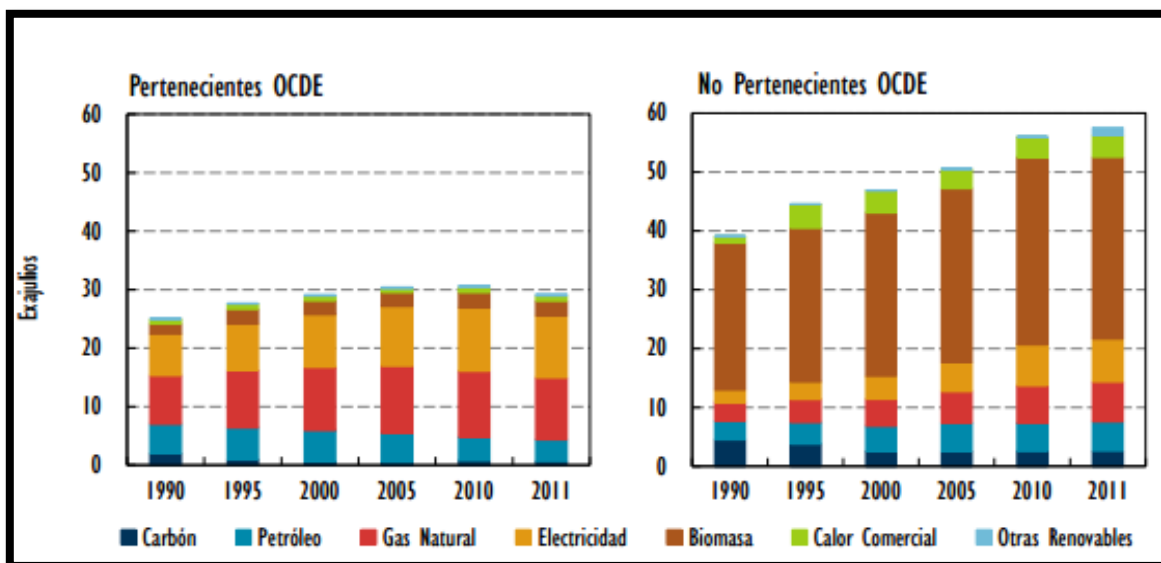


Figura 2.1 Consumo energético residencial en los países pertenecientes a la OCDE y no perteneciente a la OCDE.

Para el caso del sector residencial de México, en 2013 se tuvo un consumo de 742.74 Petajoules⁸, representó el tercer lugar en cuanto a uso total de la energía a nivel nacional. Los usos finales de energía principales son calentamiento de agua, cocción de alimentos, calefacción y enfriamiento del espacio, iluminación, refrigeración y uso de equipos domésticos

⁷ Indicadores de Eficiencia Energética: Bases Esenciales para el Establecimiento de Políticas, International Energy Agency (IEA).

⁸ Balance Nacional de Energía, SENER 2013.

En 2010 el Consejo Estadounidense de Edificación Sustentable calcula que en promedio, la edificación eficiente reduce 30% el uso de energía, 35% las emisiones de carbono y de 30% a 50% el consumo de agua, además de que genera ahorros de 50 a 90% en el costo del manejo de los desechos⁹, reafirmando la importancia de buscar alternativas para el abastecimiento de energía limpia a sectores de alto consumo energético como el residencial.

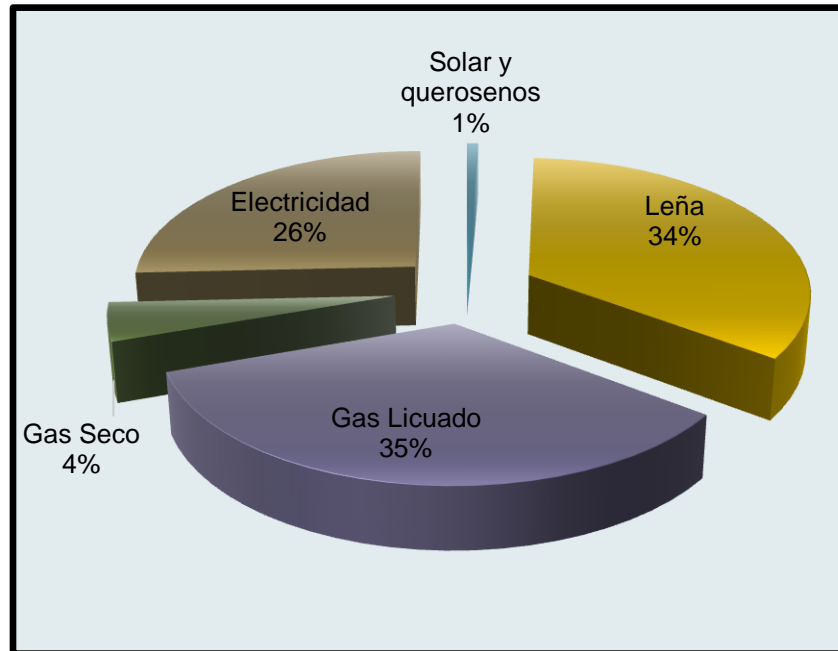


Figura 2.2 Porcentaje del consumo de energía por energético del sector residencial, SENER 2013

Fuente: Balance Nacional de Energía, 2013

2.1.2 Elementos de una vivienda sustentable energéticamente

Una vivienda es denominada como sustentable energéticamente, cuando en el balance de la energía necesaria para su operación a lo largo de un año, la diferencia de la energía importada provocada por el uso de aparatos eléctricos, luminarias y gas para el calentamiento de agua menos la energía exportada por el uso de componentes, materiales y sistemas¹⁰, incluyendo sistemas de generación de energía con fuentes renovables, se obtiene un resultado igual a cero, si este valor es menor a cero solo se tendrá un grado de eficiencia, mientras que si es obtenido un valor mayor a cero se genera más energía de la necesaria para el funcionamiento de la vivienda, concepto conocido como plus energy.

⁹ Green Building Research, US Green Building Council, USGBC, EUA, 2010

¹⁰ Sartori, et. Al., Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings, Euro Conference, Graz, Austria, (2010)

- ◆ **Energía entregada.** Flujo de energía de la red externa hacia el edificio, especificada por cada carga de energía en kWh/m²/año. También se puede referir a esto como la energía importada por el edificio.
- ◆ **Energía exportada.** Flujo de energía proveniente del edificio hacia la red o redes, especificada por cada carga en kWh/m²año.
- ◆ **Demanda.** La demanda de energía del edificio, especificada por cada carga en kWh/m² año. Cabe aclarar que la carga no siempre puede coincidir con la energía entregada al edificio para su consumo.
- ◆ **Generación.** La generación de energía por parte del edificio, especificada por cada carga en kWh/m² año. Al igual que la demanda, la generación de energía no siempre puede coincidir con la energía exportada para el consumo del edificio.
- ◆ **Sistema de ponderación.** La ponderación del sistema se refiere a convertir las unidades físicas en otras unidades métricas; por ejemplo, la contabilidad de la energía importada (o emisiones de CO₂ liberadas) para extraer, generar y entregar la energía. Estos factores de ponderación en ocasiones son reflejo de las preferencias políticas de cada localidad y no las puramente científicas.
- ◆ **Ponderación de la demanda.** Es la suma de toda la energía entregada o importada, se obtiene sumando todas las cargas de energía multiplicadas por su respectivo factor de conversión.
- ◆ **Ponderación del suministro.** La suma de toda la energía exportada o generada, se obtiene sumando todas las cargas de energía multiplicadas por su respectivo factor de conversión.
- ◆ **Balance de energía.** Es el resultado de la diferencia entre la importación y la exportación de energía en un periodo de tiempo determinado, el cual puede resultar: ≤ 0 ; > 0 .

2.1.3 Gases de efecto invernadero

Se llama efecto invernadero al fenómeno por el cual determinados gases de la atmósfera retienen parte de la energía que el suelo emite por haber sido calentado por la radiación solar. Es un proceso normal que evita que la energía del Sol recibida constantemente por la Tierra, vuelva inmediatamente al espacio, produciendo a escala mundial un efecto similar al observado en un invernadero.

El dióxido de carbono (CO₂), supone el 70% de los GEI. Su alta concentración en la atmosfera es debido al uso de combustibles fósiles para procesos industriales, de transporte y generación de energía eléctrica, entre otros.

En la tabla 2.1 se presenta el consumo de energía en el sector residencial por tipo de energético y su equivalencia en Mton de CO₂:

Tabla 2.1 Consumo de energía por tipo de energético y su equivalencia en Mton de CO₂ en el sector residencial de México, 2008¹¹

Energéticos	Consumo de energía (PJ)	Factor de Conversión	Emisiones de Mton de CO ₂	Porcentaje %
Petróleo y derivados	304.07	0.385	32.52	38.89
Gas natural	30.71	0.216	1.72	2.06
Combustibles Renovables y desechos	262.05	0.385	28.02	33.51
Electricidad	196.51	0.385	21.02	25.13
*Refrigeradores	79.14	0.385	8.46	40.27
*Lavadora de ropa	5.94	0.385	0.64	3.02
*T.V./Entretenimiento en casa	24.60	0.385	2.63	12.52
*PC/Tecnologías de comunicación	0.72	0.385	0.08	0.37
*Otros electrodomésticos	12.88	0.385	1.38	6.55
Otros	3.20	0.385	0.34	0.41
Total	796.54	-----	83.62	100

*Consumo de energía de principales electrodomésticos pertenecientes al consumo energético por electricidad

2.2 Recurso solar

El sol es una esfera constituida de gases calientes, donde el hidrógeno y helio son los elementos predominantes en su composición con un 71% y 27%.. Su diámetro es de 1.39×10^9 metros y la temperatura de su superficie fluctúa en los 5600 °C.

Por su capacidad de emitir y generar energía del recurso solar, se considera como una fuente renovable a nivel mundial para satisfacer todas las necesidades energéticas actuales, con ventajas como ahorro energético y mitigación de gases de efecto invernadero GEI, además los costos de generación de kW por medios solares está cercana a equipararse con la generación de energía con fuentes no renovables, aunque en décadas pasadas no se le había prestado el suficiente interés a las energías renovables como lo es la solar.

Debido a las crecientes problemáticas que se enfrentan por el cambio climático y el agotamiento de las energías no renovables, se han creado metas de mitigación

¹¹ Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos, 2011

de GEI mediante la transición energética al sustituir gradualmente el uso de energía convencional con energía renovable¹², siendo la energía solar la de mayor potencial para generar energía limpia (Figura 4).

La energía solar se puede aprovechar de forma pasiva o activa, conceptos descritos en el siguiente apartado.

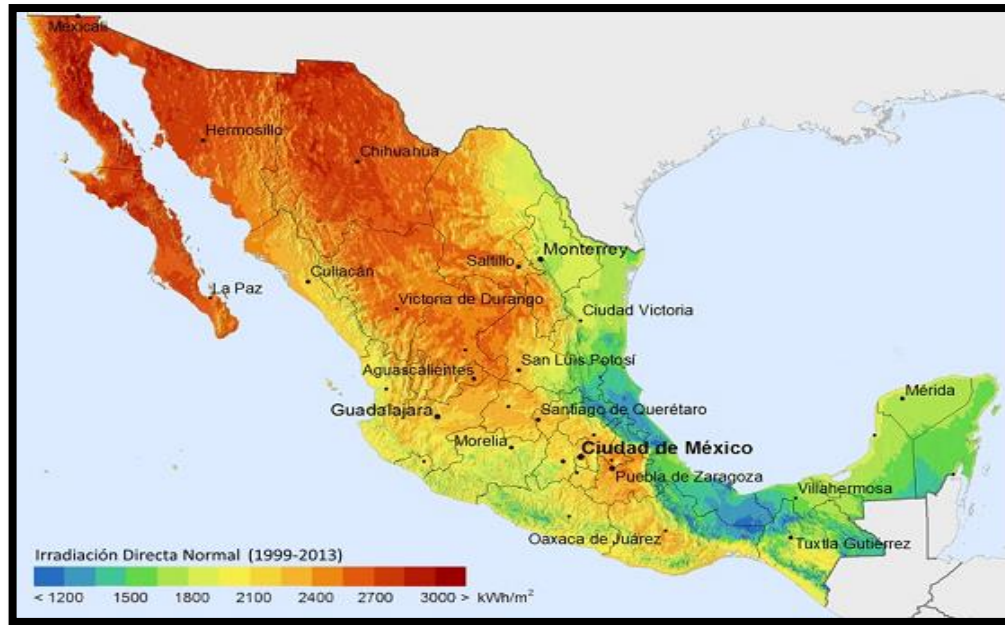


Figura 2.3 Irradiación directa normal incidente en la República Mexicana, período 1999 – 2013¹³.

2.2.1 La energía solar aprovechada en forma pasiva

El aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva no utiliza ningún tipo de tecnología o de energía generada con recursos no renovables, basa su funcionamiento en el conocimiento de las condiciones climáticas específicas del lugar como temperatura del aire, radiación solar, viento y humedad relativa, así como orientación del edificio, tamaño de las ventanas, materiales de construcción, etc.

El correcto aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva puede asistir al control de las ganancias térmicas por radiación y convección a través de las superficies transparentes y opacas de un espacio -Control solar y materiales de construcción adecuados-, iluminar naturalmente en interiores y exteriores, calentamiento solar de agua CSA, entre otros.

¹² Acuerdo de París, 2016.

¹³ www.Heliogis.com



Figura 2.4 Algunas aplicaciones de la energía solar térmica

Fuente: www.solar-energia.net

2.2.1.1 Formas de transmisión de calor

El calor se propaga a través de los materiales por diferentes medios o formas. Cada uno de los materiales se calienta a diferentes velocidades y retiene el calor en función de sus características, por lo que cada uno tendrá diferentes temperaturas.

Las formas de transmisión o propagación de calor se lleva a efecto por los fenómenos de radiación, convección y conducción.

Radiación: Es la propagación del calor en forma de radiaciones, de ondas electromagnéticas. Se propaga en línea recta a través de todos los medios. La radiación solar llega a tierra y calienta los cuerpos, los cuales la irradian. La radiación solar es de onda corta y la radiación de los cuerpos calientes es de onda larga.

Convección: Es la transmisión de calor a través de los fluidos (gases o líquidos). El calor se transmite al fluido por conducción, la densidad del fluido se reduce, éste se dilata y sube, su lugar es ocupado por moléculas frías.

Conducción: Es la transmisión de calor en forma directa de molécula a molécula en el mismo cuerpo o en contacto directo entre cuerpos. Se lleva a cabo en todas direcciones.

2.2.1.2 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas

Las ganancias y/o pérdidas térmicas en los sistemas constructivos y materiales de construcción a través de ventanas, techos y muros, son a consecuencia de los fenómenos de transmisión del calor mediante la radiación, convección y conducción que deben incluirse en un balance energético.

Para evitar las ganancias de calor se cuenta con el control solar, que es una forma de climatización pasiva y es un tema profundamente ligado con la arquitectura, funciona al coleccionar y almacenarse la energía térmica integralmente dentro de la estructura de la vivienda, mediante las ventanas y puertas que pueden servir como colectores, con almacenamiento provisto como calor sensible en la estructura de la vivienda y así climatizarse la vivienda a medida que cambia la temperatura.

Los materiales de construcción y sistemas constructivos generan un alto impacto en el comportamiento térmico y energético de las edificaciones, el desempeño es diferente en cada material, resultando ventajoso para algunas zonas y para otras no tanto, dependiendo de las condiciones climáticas del lugar y selección de dichos materiales. La inercia térmica de los materiales es una característica que debe ser considerada al momento de seleccionar los materiales de construcción, que se define como la amortiguación en la variación de las temperaturas, se almacena y retrasa la temperatura interior respecto a la exterior.

El conjunto de sistemas de almacenamiento de energía termosolar por muros y techos además de ganancias directas por puertas abiertas y ventanas, también se conoce como la envolvente de la vivienda –superficies transparentes y opacas-. Para las ventanas existen vidrios con recubrimientos de materiales selectivos a la radiación solar, que se conocen como filtros solares. Se necesita que los filtros impidan el paso de la radiación solar, cuya longitud de onda está dentro del intervalo del infrarrojo cercano (radiación térmica), y permitan el paso de la radiación solar visible.

La envolvente de la vivienda es la separación entre su entorno interior con el exterior. Considera factores climatológicos que intervienen en su desempeño térmico: radiación solar, velocidad, fuerza y frecuencia del viento, temperatura del aire y humedad relativa, así como también: latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar y orientación, entre otros.

2.2.1.2.1 Dispositivos de control solar pasivos

Los dispositivos de control solar pasivos se encargan de proteger u obstaculizar la irradiación solar directa en las partes vulnerables de la envolvente como puertas y ventanas, el término pasivo se refiere a que no se usa algún tipo de tecnología en su funcionamiento. Con un correcto diseño de los dispositivos de control solar, se puede conseguir el sombreado en verano y el calentamiento pasivo en invierno.

El alero es un dispositivo horizontal que sobresale de la parte superior de la ventana y que obstruye la componente vertical de la radiación solar (Morillón, 2004). Los aleros se diferencian según su ángulo de protección, formado por el plano horizontal en la base de la ventana y una línea imaginaria que une la parte más sobresaliente del alero con el punto más bajo de la ventana.

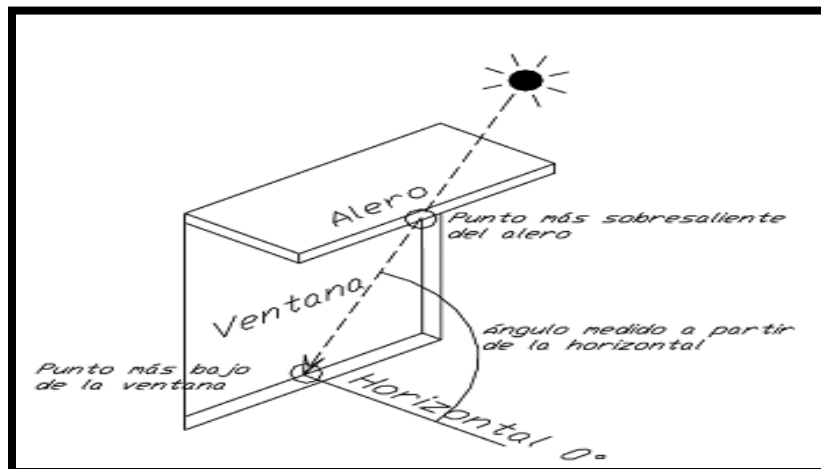


Figura 2.5 Alero¹⁴

El partesol es definido como cualquier elemento vertical cercano a la ventana que obstruya la componente horizontal de la radiación solar, sobre todo en las horas cercanas a la salida y puesta del sol, los partesoles se delimitan por su ángulo de protección, definido por el plano vertical de la ventana y por una línea imaginaria que une el punto más sobresaliente del partesol con el extremo opuesto de la ventana.

¹⁴ Mejía D. y Morillón D., Modelo de diseño y evaluación del control solar en edificios, Series del Instituto de Ingeniería - UNAM, 2004.

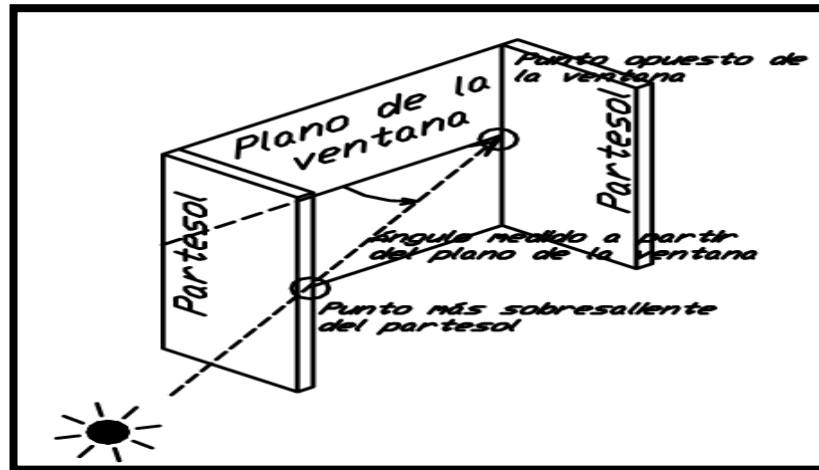


Figura 2.6 Partesol¹⁵

El vidrio de control solar actúa como sistema pasivo que evita las ganancias térmicas en verano o pérdidas térmicas en invierno, en la edificación. Es un producto de alta tecnología creado por la industria del vidrio para permitir que la luz solar pase a través de ventanas o fachadas y, al mismo tiempo, irradie o refleje gran parte del calor del sol hacia el exterior. El espacio interior permanece iluminado y se mantiene mucho más fresco de lo que estaría si se empleara vidrio convencional.

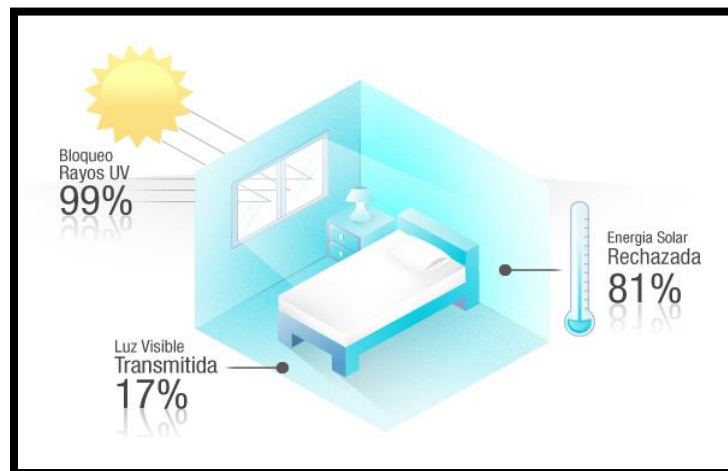


Figura 2.7 Ejemplo de funcionamiento de ventana con filtro solar

Fuente: www.3mlaminas.cl

La eficiencia de los dispositivos de control solar depende de la cantidad de superficie cubierta dada durante el periodo de verano sin oponerse a la energía del sol durante el periodo de invierno, de acuerdo con los requerimientos demandados de climatización. La eficiencia de estos elementos debe

¹⁵ *Ibíd.*

determinarse mediante su funcionamiento en ambos semestres, en medida como sea equilibrado su funcionamiento como elemento sombreador y su funcionamiento como elemento que admite el paso de la radiación solar, será su evaluación de efectividad de estos dispositivos.

2.2.1.3 Iluminación natural

La iluminación natural proviene del sol y debe ser aprovechada a través de ventanas, domos y algunos tipos de puertas, entre otros.

Además, al utilizar la iluminación natural se puede cumplir con los requerimientos de niveles de iluminación establecido en algunas Normas Oficiales Mexicanas según la actividad visual a realizar en horas diurnas.

Sin embargo es importante mencionar que la luz que proviene directamente del sol, iluminando superficies normales a ella, excede los luxes admisibles por la vista humana que se pueden derivar en una incomodidad visual, por ello la importante de realizar un correcto diseño lumínico para evitar esas repercusiones como deslumbramiento provocadas por la luz natural.

2.2.1.3.1 Conceptos de iluminación natural

- ◆ Albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre la misma.
- ◆ Brillo es la intensidad luminosa que una superficie proyecta en una dirección dada, por unidad de área.
- ◆ Iluminación; iluminancia es la relación de flujo luminoso incidente en una superficie por unidad de área, expresada en luxes.
- ◆ Lux (lx) es utilizada en fotometría como medida de la intensidad luminosa.
- ◆ Luz natural directa es la porción de luz natural que incide en un lugar específico proveniente directamente desde el sol. La luz solar directa se caracteriza por su continuo cambio de dirección, su probabilidad de ocurrencia y la iluminancia que produce en una superficie horizontal no obstruida.
- ◆ Luz natural difusa es aquella que tiene aproximadamente la misma intensidad en diferentes direcciones.

- ◆ Para aplicaciones de iluminación natural de edificios, lo que caracteriza la cantidad de luz natural disponible es la iluminancia en una superficie horizontal exterior no obstruida.
- ◆ Luz natural indirecta es la que llega a un espacio determinado por reflexión generalmente en muros, pisos o cielorrasos. En los climas soleados, la luz natural indirecta constituye un verdadero aporte a los sistemas de iluminación natural, mediante uso de superficies reflectoras que dirigen la luz solar directa por ejemplo al cielorraso aumentando la cantidad de luz natural disponible y mejorando su distribución.
- ◆ Nivel de iluminación es la cantidad de flujo luminoso por unidad de área medido en un plano de trabajo donde se desarrollan actividades, expresada en luxes.
- ◆ Reflexión es la luz que incide en un cuerpo y es proyectada o reflejada por su superficie con el mismo ángulo con el que incidió.



Figura 2.8 Vivienda iluminada naturalmente¹⁶

¹⁶ <http://imagenesdecasas10.com>

2.2.1.4 Calentamiento solar de agua CSA

Los calentadores solares de agua (CSA) son sistemas dotados con un elemento captador de los rayos del sol para calentar el líquido y un depósito para almacenar el agua caliente.

Existen dos tipos de CSA, en función del material captador empleado: los colectores solares planos y los de tubos evacuados.

- ◆ Los colectores solares planos (CSP) tienen como elemento captador una placa de cobre. Por sus características, se les llama también de baja temperatura, pues sólo alcanzan entre 30° C y hasta 80 °C, según el diseño particular del CSP.
- ◆ Los colectores de tubos evacuados utilizan como colector solar un arreglo de dos tubos concéntricos de cristal, con vacío ente ambos, donde el ubicado en el interior está provisto de una capa que absorbe el calor. Estos equipos también llamados de alta temperatura pueden alcanzar hasta de 80 ° C.
- ◆ Por otro lado, desde el punto de vista operacional, los CSA se clasifican en: termosifónicos, con intercambiador de calor y de respaldo integrado.
- ◆ El sistema termosifónico es el más comúnmente usado en el sector residencial, y debe su nombre al fenómeno que hace que fluya el agua entre el elemento captador y el depósito, llamado también termotanque.
- ◆ Los sistemas con intercambiador de calor, conocidos también como de circulación forzada, no almacenan propiamente el agua caliente en el llamado termotanque, sino que toman el calor de un fluido (que puede ser agua u otro líquido) que circula en el colector solar y lo llevan a un tanque, el cual, a su vez, transfiere el calor al agua sanitaria. En algunos casos, este termotanque cuenta con una resistencia eléctrica, la cual calienta el agua cuando la temperatura desciende a un nivel predeterminado.

El llamado sistema de respaldo integrado es idéntico al termosifónico, excepto que en el termotanque se encuentra una resistencia eléctrica, que calienta el agua bajo un sistema de control o cuando el usuario lo solicita.

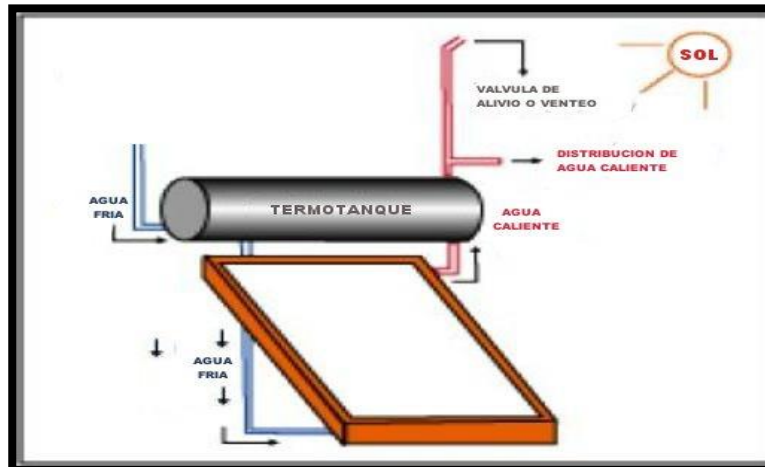


Figura 2.9 Calentador solar de agua CSA¹⁷

2.2.2 La energía solar aprovechada en forma activa

El aprovechamiento de la energía solar en forma activa se caracteriza por utilizar algún tipo de tecnología, su rendimiento energético depende de las características climáticas específicas del lugar como condiciones de cielo, radiación solar, además de otros factores como la densidad urbana.

2.2.2.1 Sistemas Fotovoltaicos

Los sistemas fotovoltaicos basan su funcionamiento en el efecto fotoeléctrico para convertir la energía lumínica proveniente del sol en energía eléctrica. Este proceso de generación de electricidad renovable no contamina, no emite GEI y su mantenimiento es mínimo.

2.2.2.1.1 Conceptos de los Sistemas Fotovoltaicos

- ◆ Ángulo de inclinación es el ángulo entre un nivel de captación inclinado y la horizontal. En función del grado de latitud del lugar de colocación de la instalación solar existen distintos grados de inclinación óptimos.
- ◆ Celda solar fotovoltaica es un dispositivo hecho de materiales semiconductores que convierten la luz solar directa y difusa en electricidad.
- ◆ Irradiación es la energía por unidad de superficie (kWh/m²).
- ◆ Irradiancia es la potencia por unidad de superficie (kW/m²).

¹⁷ <http://ecohabitat.mx>

- ◆ Irradiancia difusa procede de la atmósfera y es consecuencia de los procesos de reflexión, difracción, dispersión y absorción.
- ◆ Irradiancia directa procede del sol y depende de su posición.
- ◆ Irradiancia reflejada procede de la reflexión de la radiación incidente sobre el entorno.
- ◆ Irradiancia Global (G) es la suma de la irradiancia directa + la irradiancia difusa + la reflejada (W/m^2). Radiación solar incidente sobre una superficie.
- ◆ Módulo Fotovoltaico está formado por celdas fotovoltaicas, las cuales recolectan los rayos del sol y los convierten en corriente directa (DC).
- ◆ La Potencia Pico (kWp) es la máxima que genera un panel o conjunto de paneles en las horas de máxima insolación establecidas en: $1000 W/m^2$ (energía incidente por metro cuadrado) y a $25^{\circ} C$ de temperatura ambiente.



Figura 2.10 Sistema FV instalado en una vivienda¹⁸

¹⁸ <https://geoclass.wordpress.com/>

3.0 Método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios: Diseño Bioclimático, Iluminación Natural, Tecnología Térmica y Fotovoltaica

En este método se propone el uso de la energía solar integrada al edificio desde su diseño con el control de ganancias o pérdidas térmicas en superficies transparentes y opacas de la envolvente del edificio, así como de un diseño lumínico, hasta su operación con el uso de tecnología térmica para el calentamiento de agua y generación de energía eléctrica por medio de sistemas fotovoltaicos, se espera lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable o plus energy, es decir, que la energía necesaria para el funcionamiento de un edificio sea menor o igual a la generada con la integración de la energía solar pasiva y activa, además de mantener o provocar confort higrotérmico en los usuarios. Para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios, considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica se propone seguir el siguiente método:

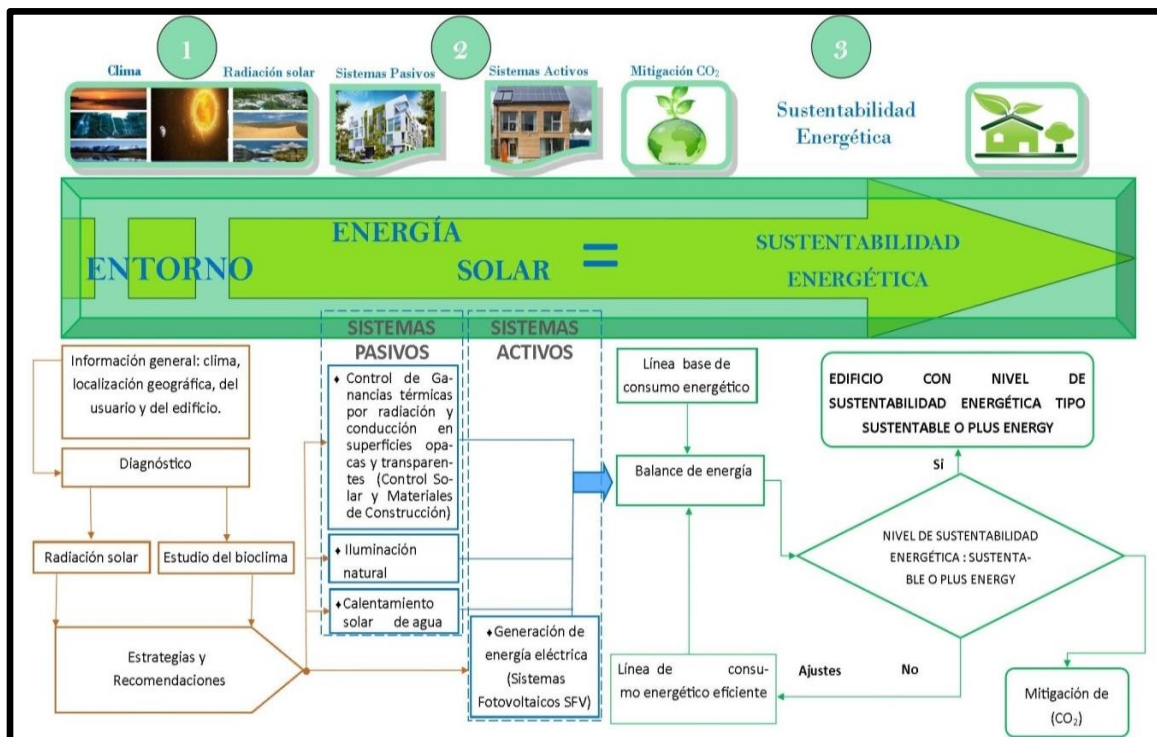


Figura 3.1 Método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios: diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica. Fuente: Elaboración propia

3.1 Entorno



Figura 3.2 Información general y específica del entorno

Fuente: Elaboración propia con información del trabajo: Metodología para el diseño bioclimático (Morillón, 2002)

En esta etapa se presenta información general específica para cada lugar como es del tipo de usuario, del tipo y uso del edificio, clima y localización geográfica, con este contexto específico para cada lugar se podrá realizar un diagnóstico, mediante un estudio del bioclima, y, al analizar y cuantificar el recurso solar, con el fin de presentar los fundamentos necesarios que son utilizados en este trabajo para aprovechar la energía solar integrada al edificio, posteriormente se proponen estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares que a través de sistemas pasivos con el control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en la envolvente, iluminación natural y calentamiento solar de agua, y el uso de sistemas activos para la generación de energía eléctrica mediante los sistemas fotovoltaicos, se puede lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable o plus energy además de provocar o mantener confort higrotérmico en los usuarios.

3.1.1 Información general

El método propuesto para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios, comienza con la recopilación de información climática, geográfica, del usuario y tipo de uso del edificio de una región.

Se debe de realizar un análisis de una línea base de consumo de energía y de sus usos finales –información del usuario y edificio–.

Para conocer el clima de un lugar, se deben considerar los principales parametros que intervienen: temperatura del aire, humedad, viento y radiación solar. Los datos geográficos a considerar son latitud, longitud y altura.

El usuario (seres humanos, plantas y/o animales) y tipo de uso que se le da al edificio son parametros importantes que deben tomarse en cuenta, algunos factores que pueden intervenir referente al usuario es su edad, masa, estatura, tasa metabólica y aislamiento térmico proporcionado por la ropa. El tipo de edificio se puede clasificar según las actividades que se desarrollan durante el día, además de que se puede clasificar en edificio de uso residencial y no residencial.

3.1.2 Diagnóstico

En esta parte del trabajo se realiza un diagnóstico de la información general, proporcionando primero un análisis de la temperatura del aire y humedad relativa mediante el estudio del bioclima además de realizarse un análisis del recurso solar, dando como resultado la evaluación del recurso solar y un diagrama de isorrequerimientos mismo que indica las condiciones horarias de frío, calor y confort que presentan los ocupantes del edificio.

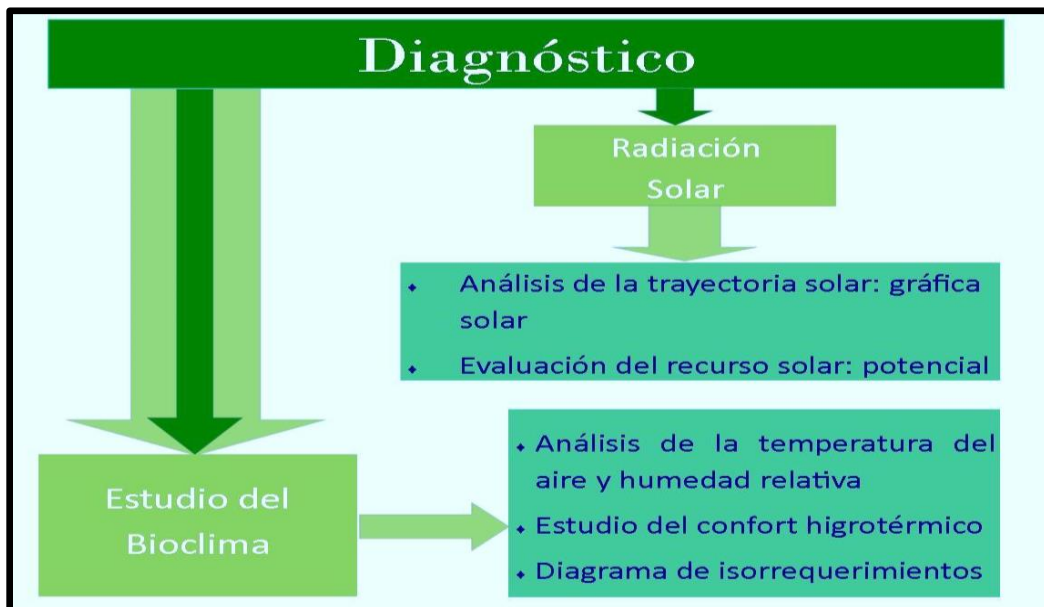


Figura 3.3 Esquema para el diagnóstico: estudio del bioclima y de la radiación solar

Fuente: Elaboración propia

3.1.2.1 Estudio del Bioclima

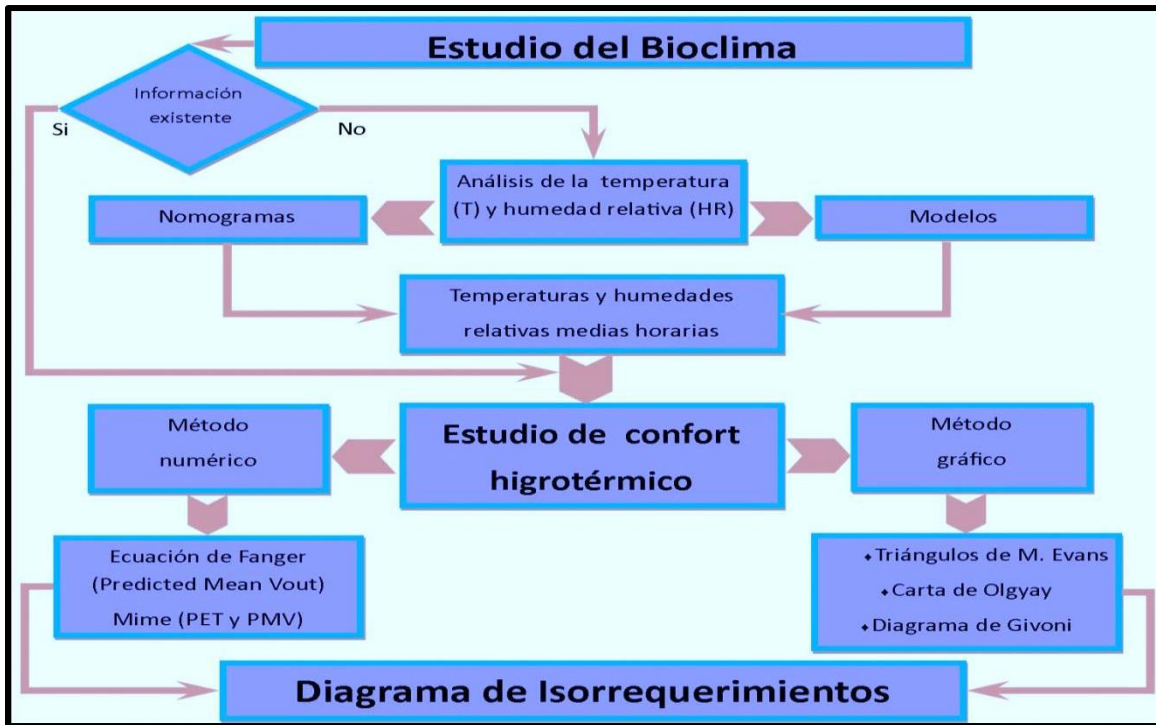


Figura 3.4 Diagrama con las etapas del estudio del bioclima

Fuente: Elaborado con información del trabajo: “Atlas del Bioclima de México (Morillón, 2004)”

El estudio del bioclima es una herramienta del diseño bioclimático, que analiza las temperaturas y humedades horarias de una región, información que permite realizar un estudio de las condiciones de confort higrotérmico de los usuarios que ocupan el edificio. Para llevar a cabo este estudio existen diversos trabajos e investigaciones, para este trabajo se selecciona la Metodología de evaluación y delimitación de las condiciones de confort higrotérmico¹⁹.

- i. **Obtener información del clima.** Inicialmente se requieren datos de temperatura máxima y mínima promedio mensual, y, de la humedad relativa promedio mensual, tomados preferentemente de alguna estación meteorológica del sitio. Posteriormente se elabora un archivo de temperaturas horarias de la temperatura del aire, para calcular aproximadamente la evolución de los valores de la temperatura horaria se utilizan los datos de la temperatura máxima y mínima promedio mensuales. Se cuenta con el nomograma propuesto por M Evans (1980) para aproximar esta evolución horaria. Para este trabajo se considera el modelo de simulación de la marcha diaria de la temperatura y humedad ambiente (Tejeda y García, 2002).

¹⁹ Morillón Gálvez, David. Atlas del Bioclima de México, Serie de Investigación y desarrollo, Instituto de Ingeniería, UNAM, México, 2004.

Con este modelo, los datos de entrada requeridos son temperatura máxima y mínima promedio. Se tiene un error estándar de estimación de 0.8 °C a 98% de certeza, para el caso de la humedad relativa (HR) la horaria media mensual es obtenida mediante las medias extremas, con un error estándar de 5% de HR a 95% de confiabilidad, se obtienen resultados admisibles para la mayoría de las aplicaciones de diseño bioclimático. El programa Biosol (Preciado y Morillón, 2010) es utilizado para elaborar esta parte del trabajo, requiriendo datos geográficos de latitud, longitud y altura sobre nivel del mar del lugar, además de las temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales, dicho programa utiliza el método propuesto por Tejeda (2002) de simulación de la marcha diaria para calcular temperatura y humedad relativa horaria promedio mensual.

- ii. **Calcular la temperatura de confort.** Es calculada por medio de la fórmula propuesta por Auliciems (1990) y determina la zona media de confort en función de la temperatura del medio ambiente:

$$T_n = 17.6 + (0.31) \cdot (T_{ma}) \quad (1)$$

Se definen los términos a continuación:

T_n: temperatura neutra del mes; T_{ma}: temperatura media del mes

- iii. **Determinar la amplitud de la zona de confort.** La diferencia de la temperatura promedio máxima y mínima del mes, da como resultado la oscilación de temperaturas. La amplitud de la zona de confort se determina con el rango de oscilación de temperaturas (Tabla 3.1), delimitando la zona donde se percibe confort.

Tabla 3.1 Oscilación media de la T_{amb} Vs Amplitud de zona de confort.

Oscilación media de la temperatura del aire °C	Amplitud de la zona de confort ΔT [°C]
Menos de 13	2.5
13-15	3
16-18	3.5
19-23	4
24-27	4.5
28-32	5
33-37	5.5
38-44	6
45-51	6.5
más de 51	7

iv. Se analizan las condiciones de sensación higrotérmica. Para el análisis de las condiciones de confort se cuenta con métodos gráficos como el diagrama de Givoni, la carta bioclimática Olgay, igualmente existen métodos numéricos como el uso de las Tablas de Mahoney y los algoritmos de Fanger que considera el Predicted Mean Vote (PMV) que proporciona una estimación en una escala psicofísica de la sensación de confort que experimentará un gran grupo de personas, que toma entre otros factores la temperatura y humedad relativa del aire.

En este trabajo se utiliza la carta bioclimática de Olgay, debido a que distingue cuatro variables importantes del entorno: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y movimiento del aire, indicando además su interacción. En la carta bioclimática de Olgay, se identifican dos partes principales que la constituyen que son: una plantilla donde se presenta en el eje de las ordenadas las temperaturas con rangos que van de -10°C hasta 50°C y en el eje de las abscisas las humedades relativas que van de 0% a 100%, la otra parte que constituye la carta es la zona de confort que va acompañada con las estrategias de climatización para lograr estar dentro de esa zona (calentar, enfriar y humidificar), a continuación se describen los pasos para utilizar la carta bioclimática de Olgay mismos que se realizan para cada mes:

a. Datos

- Humedad relativa horaria
- Temperatura horaria
- Temperatura neutra para cada mes a analizar

b. Adaptación

Se adapta la carta bioclimática de Olgay para el lugar que se requiera analizar:

- ◆ Se procesan los datos de temperatura y humedad relativa horaria del mes a analizar en la plantilla, tomando en cuenta el orden que lleven, por ejemplo que la temperatura de las 13 horas vaya conectada con la humedad relativa de las 13 horas que representará un solo punto dentro de la plantilla, este mismo procedimiento se realiza para las 24 horas.
- ◆ La temperatura neutra del mes a analizar (zona de confort), se sobrepone al 50% de la humedad relativa de la plantilla.
- ◆ Se cuantifican los puntos que representan la humedad relativa y temperatura horaria dentro de la plantilla, dependiendo en la zona que se encuentre cada

punto representa la sensación que se presenta de frío, calor o confort, información que servirá de base para la elaboración del diagrama de isorrequerimientos.

- ◆ Se realiza un análisis de las condiciones higrotérmicas para el mes a analizar y las estrategias que recomienda Olgay para mantener o alcanzar la zona de confort higrotérmico.

v. Análisis del diagrama de isorrequerimientos

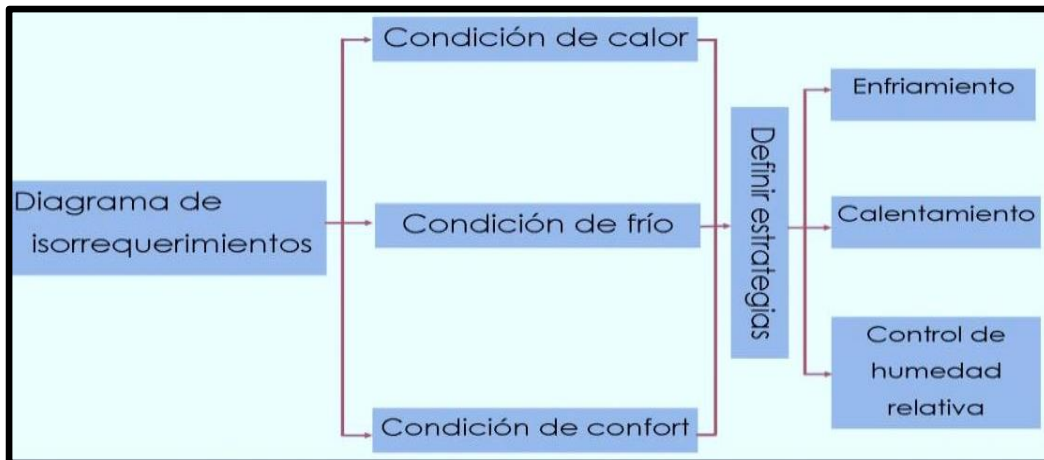


Figura 3.5 Esquema de las estrategias de climatización a partir de datos proporcionados en el diagrama de isorrequerimientos. Fuente: Elaboración propia

Las condiciones de sensación higrotérmica de frío, calor y confort identificadas en la carta bioclimática de Olgay para cada mes son vertidas en forma horaria en un diagrama que se conforma de 24 filas que constituyen las horas del día y 12 columnas representando los meses del año.

Con el diagrama de isorrequerimientos elaborado, se pueden identificar las sensaciones de confort, calor o frío que presenta el usuario, dando oportunidad de establecer estrategias de climatización para mantener o lograr el confort higrotérmico con el menor uso posible de energía convencional, como por ejemplo cuando se presentan condiciones de calor y confort utilizar control solar así como aprovechar el uso de la iluminación natural indirecta, en los periodos de frío es conveniente la iluminación natural directa que además sirve como sistema pasivo de climatización, y, con la utilización de algunos materiales de construcción que dependiendo de las necesidades de climatizar mediante sus características específicas como inercia térmica pueden provocar condiciones de comodidad higrotérmica en los usuarios (Figura 3.5).

3.1.2.2 Radiación solar

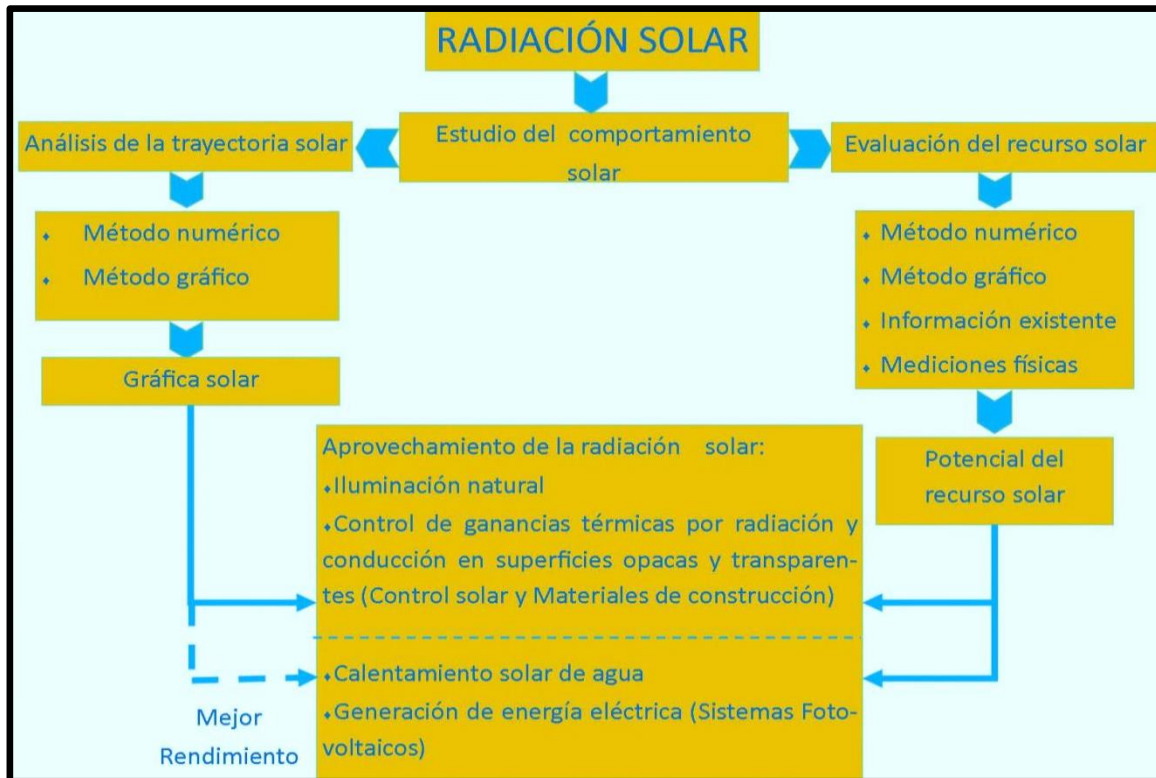


Figura 3.6 Esquema para la radiación solar: análisis de la trayectoria solar y evaluación del recurso solar. Fuente: Elaboración propia

La energía solar aprovechada en forma activa como generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos y en forma pasiva mediante climatización (control solar), iluminación natural, calentamiento solar de agua, uso de materiales de construcción, etc., dependen de la disponibilidad de la irradiación solar que varía según el tipo de clima, localización geográfica, etc. Primeramente se debe realizar un estudio del comportamiento solar para elaborar un análisis de la trayectoria solar para posteriormente realizar una evaluación del recurso solar que permitirá conocer el potencial del recurso (Figura 3.6).

3.1.2.2.1 Análisis de la trayectoria solar: gráfica solar equidistante

Mediante un estudio del comportamiento solar de una región, es posible conocer la trayectoria solar con herramientas como la gráfica solar.

Para cualquier instante es posible establecer la posición del Sol midiendo los ángulos denominados altura solar y azimut, mismos que dependen de variables como la latitud del sitio, la hora solar y día del año.

- i. **Ángulo horario (ω).** Para fines del cálculo, la hora solar debe expresarse en grados con respecto a la posición del medio día. Esto quiere decir que el ángulo horario a las 12:00 h es 0° ²⁰, además cada hora solar equivale a 15° y para tiempo a.m. este ángulo es positivo y para p.m. es negativo, lo que se resume en la siguiente ecuación:

$$\omega = (12 - \text{hora}) \cdot 15^{\circ} \quad (2)$$

- ii. **Declinación solar (δ).** La declinación solar es el ángulo entre la posición del Sol al mediodía y el plano del ecuador, y puede obtenerse mediante la ecuación de Spencer (1971):

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \text{sen} \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \text{sen} 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \text{sen} 3\Gamma) \frac{180}{\pi} \quad (3)$$

donde:

$$\Gamma = (n - 1) \frac{2\pi}{365}$$

n = número de día del año

Γ = ángulo diario expresado en radianes

Cuando la declinación solar vale 0° , se presentan los equinoccios y cuando ésta es máxima ($\pm 23^{\circ} 27'$), los solsticios.

A estos dos elementos (δ y ω) se les denomina coordenadas horarias.

- iii. **Altura solar (α).** Es el ángulo formado por el plano del horizonte y la posición del Sol. Se calcula mediante la ecuación²¹:

$$\text{sen} \alpha = (\cos \varphi * \cos \delta * \cos \omega) + (\text{sen} \varphi * \text{sen} \delta) \quad (4)$$

donde:

φ latitud del lugar

δ declinación solar

ω ángulo horario

²⁰ Duffie, J. and Beckman, W. Solar Engineering of Thermal Processes, 2006.

²¹ *Ibidem*.

- iv. **Azimut (γ).** El azimut es el ángulo formado por el plano normal a la horizontal que contiene el eje norte-sur y el plano normal a la horizontal que contiene la posición del Sol en un determinado momento. Se calcula mediante relaciones trigonométricas con la ecuación²²:

$$\cos \gamma = \frac{\text{sen} \alpha \cdot \text{sen} \varphi - \text{sen} \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \varphi} \quad (5)$$

- v. **Gráfica solar equidistante.** La gráfica solar equidistante es un diagrama donde se puede leer la latitud y altura solar para cualquier fecha y hora.

Se considera que el observador o edificación a evaluar está en el centro del diagrama. La altura solar es medida por círculos concéntricos igualmente espaciados con el valor de los ángulos marcados en una línea a lo largo del eje norte-sur. Las líneas rectas que cortan estos círculos concéntricos radiales y que parten del centro de la circunferencia, miden el valor del ángulo del azimut solar. Las líneas curvas que van de este a oeste representan el recorrido del Sol para un día específico del año, generalmente uno por mes. Finalmente, estas curvas son cruzadas por las líneas horarias, que representan la hora solar verdadera.

Para elaborar la gráfica solar equidistante, se maneja el programa Biosol, es generada una serie de datos horarios mensuales del cálculo del azimut y altura solar, utilizando como base de cálculo las ecuaciones 2, 3, 4 y 5, obteniendo como resultado una gráfica solar equidistante representativa al azimut y altura solar correspondientes a la altitud ingresada del sitio.

²² Ibíd.

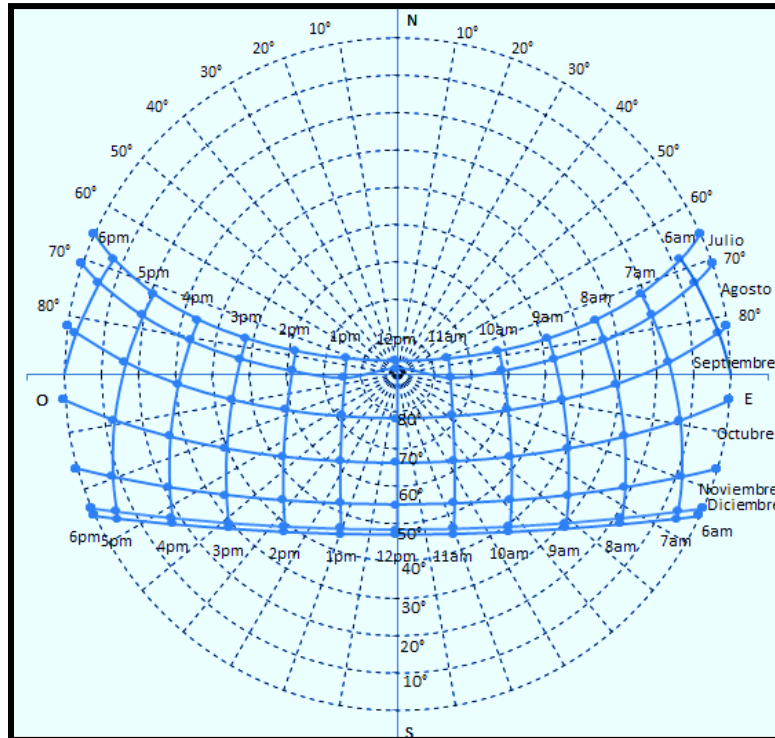


Figura 3.7 Ejemplo de gráfica solar equidistante elaborada en el programa Biosol para Texcoco, México

3.1.2.2 Evaluación del recurso solar: potencial

Para el correcto diseño y dimensionamiento de dispositivos para generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos, o generación de energía térmica utilizando calentadores solares de agua, así como conocer niveles de iluminación exteriores, ganancias de calor en la envolvente del edificio por el tipo de material utilizado, entre otras múltiples aplicaciones, es necesario evaluar la irradiación solar incidente en las superficies de los edificios para conocer el potencial del recurso en el sitio. Existen diferentes procedimientos matemáticos, gráficos, mediciones físicas así como de información existente como Atlas, Mapas, Softwares, etc., que se han desarrollado a la fecha para cuantificar la irradiación solar en superficies horizontales e inclinadas.

En México se cuenta con atlas de irradiación solar (Almanza y Estrada, 2005), donde los datos de irradiación solar pueden estar disponibles en forma de valores de irradiación horaria, en forma de totales acumulados como irradiación diaria, mensual o anual, también como promedios sobre determinados periodos de tiempo. Usualmente los datos se reporten en forma de promedios diarios para cada mes (habitualmente dada en MJ/m² o W/m²).

Ahora se describen los modelos para calcular la irradiación global, los componentes directo y difuso, así como el de su variación horaria en el transcurso del día.

3.1.2.2.2.1 Irradiación global

Reddy (1971) sugiere el uso del número de días lluviosos, latitud, humedad relativa y ubicación del lugar respecto al mar, además de la heliofanía relativa, para calcular la irradiación global diaria promedio mensual con la siguiente fórmula:

$$H = 0.0418 K [(1 + 0.8 n/N) (1 - 0.2 r/m)/(0.1 hr^{0.5})] \quad (6)$$

donde:

$$K = [(\lambda)N + (\phi) \cos (\phi)] \times 100 \quad (7)$$

ϕ = latitud del lugar, $\lambda = 0.2/(1 + 0.1 \phi)$ un factor empírico de latitud, N longitud promedio del día durante el mes, ψ factor en función de la localización del lugar y del mes, r número de días con lluvia en el mes, m número de días en el mes, hr la humedad relativa promedio mensual y n las horas de insolación diarias en promedio mensual.

La longitud del día se define con la siguiente fórmula:

$$N = 2/15 \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (8)$$

La declinación solar (δ) se calcula con la siguiente fórmula (Estrada-Cajigal, 1993):

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma)(180/\pi) \quad (9)$$

donde:

$$\Gamma = 2\pi (n_d - 1)/365 \quad (10)$$

n_d = Número de días del año

3.1.2.2.2.2 Irradiación difusa y directa

Correlación de Page (Estrada-Cajigal, 1991):

$$H_d = H [1.0 - 1.13 H/H_0] \quad (11)$$

donde la irradiación solar extraterrestre global diaria promedio mensual en una superficie horizontal se calcula con la siguiente fórmula:

$$H_o = (24 \times 3600 \text{ Gcs}) / \pi E_o [\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + (2\pi\omega_s) / 360 \sin \phi \sin \delta] \quad (12)$$

El factor de corrección de la excentricidad de la órbita terrestre se calcula con la ecuación desarrollada por Spencer (Estrada-Cajigal, 1993):

$$E_o = 1.00011 + 0.00128 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2 \Gamma + 0.00077 \sin \Gamma \quad (13)$$

El ángulo horario al alba o al ocaso (ω_s), es calculado con:

$$\omega_s = \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (14)$$

La irradiación directa horizontal promedio mensual es la irradiación global menos la irradiación difusa:

$$H_b = H - H_d \quad (15)$$

3.1.2.2.3 Irradiación horaria

Con base al estudio estadístico de la distribución horaria de la irradiación solar en varias localidades llevado a cabo por Liu y Jordan, Collares-Pereira y Rabl, 1979, desarrollaron correlaciones analíticas en función de la longitud del día y hora:

$$r_t = \pi / 24 (a + b) (\cos \omega - \cos \omega_s) / [\sin \omega_s - (\pi\omega_s / 180) \cos \omega_s] \quad (16)$$

donde $r = I/H$ es la razón entre la irradiación global horaria y la irradiación global diaria, ω es el ángulo horario en grados y los coeficientes a y b están dados por:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin (\omega_s - 60) \quad (17)$$

$$b = 0.6609 + 0.4767 \sin (\omega_s - 60) \quad (18)$$

La razón entre la irradiación difusa horaria y la irradiación difusa diaria $r_d = I_d / H_d$ se calcula con:

$$r_d = \pi / 24 (\cos \omega - \cos \omega_s) / [\sin \omega_s - (\pi\omega_s / 180) \cos \omega_s] \quad (19)$$

2.1.2.2.4 Irradiación sobre un plano inclinado

Para convertir datos de irradiación directa sobre una superficie horizontal a una superficie inclinada se realiza un planteamiento geométrico de la dirección de la irradiación de la siguiente forma:

$$I_b = I R_b \quad (20)$$

donde:

$R_b = \cos\theta / \cos\theta_z$ es la razón de la irradiación directa en una superficie inclinada y una superficie horizontal.

La irradiación difusa inclinada en el modelo HDKR se calcula con:

$$I_{db} = I_d \{ (1 - A) [0.5 (1 + \cos\beta) [1 + f \sin^3(\beta/2) + A R_b] \} + 0.2 I [0.5(1 - \cos\beta)] \quad (21)$$

donde:

A es un índice anisotrópico dado como una función de la transmitancia atmosférica para la irradiación directa, I_b / I_o , $f = I_b / I$ es un factor de nubosidad y

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\delta \sin\phi \cos\beta - \sin\delta \cos\phi \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \\ & \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \end{aligned} \quad (22)$$

siendo b el ángulo de inclinación del plano receptor con respecto a la superficie horizontal. Un caso particular es el ángulo zenital θ_z , que es el formado por la dirección de la irradiación directa y la vertical del lugar:

$$\cos\theta_z = \sin\delta \sin\phi + \cos\delta \cos\phi \cos\omega \quad (23)$$

La irradiación extraterrestre horaria promedio mensual es I que se calcula con:

$$I_o = (12 \times 3600 Gcs) / \pi E_o \{ \cos\phi \cos\delta (\sin\omega_2 - \sin\omega_1) + [2\pi (\omega_2 - \omega_1) / 360] \sin\phi \sin\delta \} \quad (24)$$

donde ω_1 y ω_2 son los ángulos horarios al inicio y al final de la hora en consideración.

3.1.3 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares

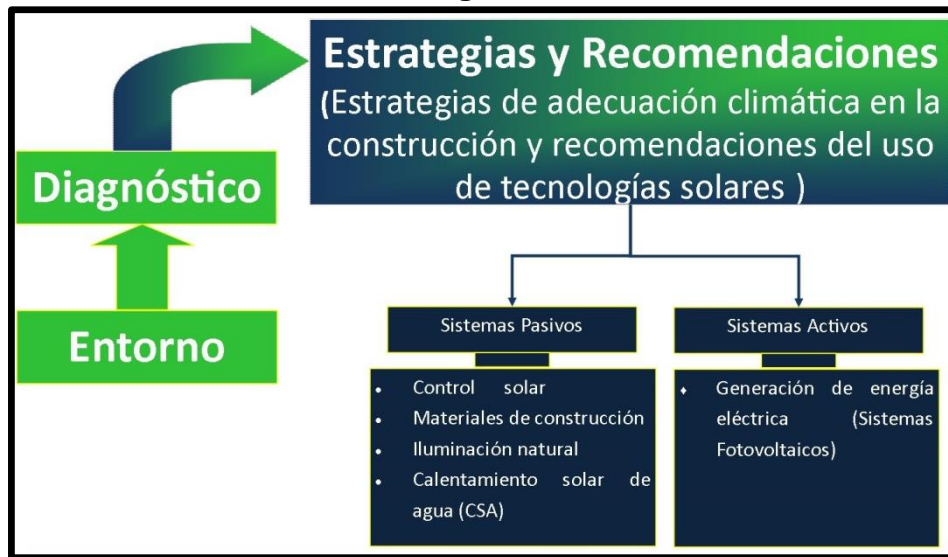


Figura 3.8 Estrategias y recomendaciones aprovechando la energía solar en forma pasiva y activa. Fuente: Elaboración propia

Con la información obtenida en el diagnóstico de climatización, además de información del entorno, es posible establecer las estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares (Figura 3.8), esta parte del método consiste en seleccionar cualitativamente y cuantitativamente los dispositivos o componentes, materiales y posición en el edificio, buscándose que la estructura del edificio al interactuar con el medio ambiente se combinen para provocar o mantener condiciones de confort higrotérmico para el usuario dentro del edificio al aprovechar o evitar las condiciones del clima, así como proveer energía lumínica, térmica y eléctrica, aprovechando la energía solar en forma pasiva y activa.

En la actualidad existen diversas tecnologías solares que pueden ser aprovechadas para diferentes aplicaciones como el calentamiento solar del agua, generación de electricidad, tratamiento de aguas residuales, estufas solares, refrigeración, etc., es posible utilizar cada una de las tecnologías solares (Figura 3.9) aunque dependerá del espacio disponible, recursos económicos, disponibilidad del recurso solar, necesidades a cubrir, entre otros factores. Se selecciona para este trabajo la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos para el aprovechamiento de la energía solar en forma activa, así como se elige el calentamiento solar de agua aprovechando la energía solar en forma pasiva integrando además la iluminación natural, climatización pasiva (control solar) y el uso de materiales de construcción que favorezcan al confort higrotérmico de sus ocupantes dentro de las estrategias y recomendaciones.

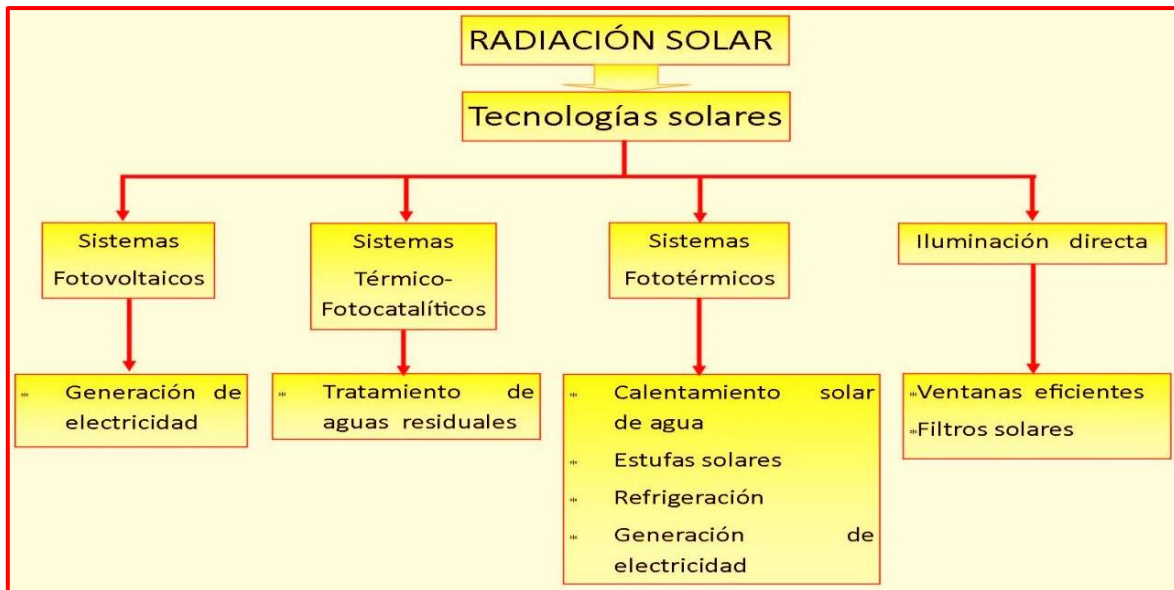


Figura 3.9 Esquema con aplicaciones de la tecnología solar

3.1.3.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva

Se considera para este trabajo el aprovechamiento de la energía solar con sistemas pasivos: la iluminación natural, calentamiento solar de agua y climatización pasiva mediante el control solar y la selección apropiada de los materiales de construcción para captar o evitar ganancias de calor a través de la envolvente del edificio, que integradas conserven o provoquen confort higrotérmico en sus ocupantes, así como de reducir el consumo de energía convencional por el uso de aire acondicionado, calefacción, gas para calentamiento de agua e iluminación artificial.

3.1.3.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

El objetivo de este apartado es limitar la ganancia y pérdida térmica por radiación, convección y conducción de la envolvente de los edificios en superficies transparentes y opacas (muros, techo y ventanas), racionalizando el uso de la energía en los sistemas de enfriamiento y mejorando las condiciones de confort higrotérmico al interior de los espacios del edificio, para lograrlo se proponen estrategias de adecuación climática en la construcción de acuerdo al lugar de estudio.

3.1.3.1.1.1 Control solar

Una de las estrategias para captar o proteger de la energía solar en forma pasiva es mediante el control solar, para diseñar dispositivos de control solar se requiere conocer las sensaciones higrotérmicas de confort, calor y frío proporcionadas por el diagrama de isorrequerimientos además de calcular la ruta solar a lo largo del día que se puede determinar mediante la gráfica solar.

Se aplica el modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios (Mejía y Morillón, 2004), es una metodología que evalúa los ángulos de dispositivos de control solar y mediante un análisis determina el más óptimo establecido por las condiciones bioclimáticas del lugar. A continuación se sintetiza el modelo:

- i. Determinar las condiciones de sensación higrotérmica horaria (Diagrama de isorrequerimientos) durante el intervalo en que el Sol se encuentra en la bóveda celeste (6:00 – 18:00 horas), se obtienen las horas de calor por mes, multiplicando las horas de calor por del mes analizado por el número de días del mes, así mismo se realiza para horas de confort y calor, se repite el procedimiento para el resto de meses.
- ii. Elaborar dos gráficas solares, una para cada semestre, determinadas por las condiciones de la región, marcando las horas en las que se requiere protección solar (sensación de calor y frío) con base en el diagrama de isorrequerimientos para ambos semestres.
- iii. Dibujar mascarillas de sombreado que representa el alero de protección desde los 0°, sobreponiendo la mascarilla sobre la gráfica solar para ambos semestres, se contabilizan las horas con requerimiento de sombra (T2) que quedan fuera del alero (K) para sobreponer en las gráficas solares y las que requieren asoleamiento (T1) que quedan fuera del alero (L). Se realiza el mismo procedimiento de 10 en 10 ° hasta llegar a 90° para aleros y partesoles (de 0° a 50°) en ambos semestres para las cuatro principales orientaciones (norte, sur, este y oeste).
- iv. Posteriormente se calcula la eficiencia del alero o partesol para el periodo de calor, con la siguiente fórmula: $EPC = 1 - (K/T2)$ (Ec. 25) y la eficiencia para el periodo de frío con: $EPF = L/T1$ (Ec. 26). Se realiza el mismo procedimiento con las mascarillas de 10°, 20°, 30°, 40°, hasta obtener toda la información acerca de la eficiencia de los aleros con diferentes ángulos de protección, para la orientación analizada.

- v. La eficiencia global de los elementos de control durante todo el año (ED), es decir, la eficiencia ponderada, se define como:

$$ED = (T1/(T1 + T2))*EPF + (T1/(T1+T2))*EPC \quad (27)$$

- vi. El ángulo óptimo de protección solar para cada orientación es el correspondiente al valor máximo de la eficiencia ponderada del alero (ED), correspondiente al punto en que se cruzan las eficiencias para los periodos de calor (EPC) y de frío (EPF).

- vii. Este procedimiento se aplica para cada una de las orientaciones, hasta obtener la información de los ángulos óptimos de protección solar para los aleros y partesoles de cada caso.

Al conocer el ángulo óptimo para los dispositivos de control solar en las diferentes orientaciones (norte, sur, este y oeste), es factible reducir las ganancias solares en la temporada de calor (primavera y verano) pero captando la radiación solar en la temporada de frío (invierno) permitiendo climatizar pasivamente el edificio al utilizar dispositivos de control solar.

3.1.3.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio

Para esta etapa del trabajo se proponen materiales de construcción y sistemas constructivos acordes al tipo de clima y disponibles en el lugar, así como aplicar las medidas de control solar para superficies transparentes de la envolvente del edificio, finalizando con una evaluación del comportamiento térmico de la envolvente del mismo para conocer la carga de calor al interior y definir las condiciones de sensación térmica de sus ocupantes.

i. Definir las generalidades del edificio proyectado

Se establecen los materiales de construcción y sistema constructivo utilizado para reducir las ganancias térmicas de la envolvente del edificio.

ii. Ganancia de calor por la envolvente

Se considera en esta etapa, el procedimiento para medir la eficiencia energética en edificios, mediante la evaluación de las ganancias de calor captadas en la envolvente de edificios para uso residencial, lo que se realiza es comparar las ganancias de calor a través de la envolvente de un edificio proyectado contra un

edificio de referencia, toma en cuenta orientación, muros ligeros y pesados así como ventanas.

Existen algunos indicadores que permiten establecer el comportamiento térmico de los materiales que son tomados para el análisis, como son la resistencia térmica y el coeficiente global de transferencia de calor “U”.

La **resistencia térmica “R”** representa la capacidad de una sustancia (sólido o fluido) para evitar el flujo de calor a través de la misma.

Para determinar la resistencia térmica se tienen las siguientes expresiones que son utilizadas según sea el caso:

$$\text{Conducción, resistencia conductiva: } R_k = L / k \quad (28)$$

$$\text{Convección, resistencia convectiva: } R_c = 1 / h \quad (29)$$

$$\text{Radiación, resistencia radiativa: } R_r = 1 / h_r \quad (30)$$

Donde:

L es el espesor del material; k es la conductividad térmica del material; h es la conductancia del aire o superficial y h_r es la resistencia radiativa

Para el caso de elementos compuestos de diversos materiales, pueden darse resistencias térmicas de tipo paralelo o en serie.

Sin embargo, no siempre los sistemas están sujetos a resistencias térmicas conductivas únicamente. Por ejemplo en un muro expuesto al ambiente, la transferencia de calor se da entre el aire exterior y el espacio interior, está sujeto a una resistencia convectiva del exterior, la resistencia conductiva propia del material y la resistencia convectiva del interior.

El **coeficiente global de transferencia de calor “U”** se expresa comúnmente como el inverso de la resistencia equivalente como un coeficiente de conductancia, que representa la velocidad de transferencia de energía que se da desde el aire exterior al aire interior a través de un muro por unidad de área y diferencia de temperatura unitaria, sus unidades son $W/m^2\text{°C}$.

El uso del coeficiente global de transferencia de calor representa una ventaja en los cálculos térmicos, el valor considera conducción y convección a ambos lados del material.

$$U = \frac{1}{R} \quad (31)$$

Donde:

R = Es la resistencia térmica total dada en $m^2\text{°C} / W$

U = Es el coeficiente de transferencia de calor total para una unidad de área, que es igual al inverso de la resistencia térmica total, que está dado en $W/m^2\text{°C}$.

Para determinar el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente de la vivienda, formado con capas térmicamente homogéneas y perpendiculares al flujo del calor, se calcula con la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n} \quad (32)$$

Donde:

R = es el aislamiento térmico total de una porción de la envolvente de la vivienda, de superficie a superficie, en $m^2 \text{°C}/W$.

h_i = es el coeficiente de convección interna en $W/m^2 \text{°C}$. Su valor es 8.1 para superficies verticales, 9.4 para superficies horizontales con flujo de calor hacia arriba (del piso hacia el aire interior o del aire interior hacia el techo) y 6.6 para superficies horizontales con flujo de calor hacia abajo (del techo al aire interior o del aire interior al piso)²³.

h_e = es el coeficiente de convección exterior y es igual a $13 W/m^2\text{°C}$ ²⁴.

n = es el número de capas que forman la porción de la envolvente de la vivienda.

l = es el espesor de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente de la vivienda, en metros.

λ = es el coeficiente de conductividad térmica de cada uno de los materiales que componen la porción de la envolvente de la vivienda, en $W/m K$.

El aislamiento térmico total de las porciones de la envolvente de una vivienda, formado con capas térmicamente no homogéneas paralela a la superficie, se calcula utilizando la siguiente ecuación:

$$R = \frac{1}{\frac{F_1}{R_{parcial} + g + \lambda_1} + \frac{F_2}{R_{parcial} + g + \lambda_2} + \frac{F_m}{R_{parcial} + g + \lambda_m}} \quad (33)$$

²³ NOM-020-ENER-2011. Eficiencia energética en edificaciones, envolvente de edificios para uso habitacional.

²⁴ Ibídem.

$$R_{parcial} = \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_e} + \frac{l_1}{\lambda_1} + \frac{l_2}{\lambda_2} + \dots + \frac{l_n}{\lambda_n} \quad (34)$$

Donde:

$R_{parcial}$ = es el aislamiento térmico de una porción de la envolvente de la vivienda, de superficie a superficie, en m^2K/W .

m = es el número de materiales que forman la capa no homogénea.

F = es la fracción del área total de la porción de la envolvente de la vivienda, ocupada por cada material en la capa no homogénea.

g = es el espesor o grueso de la capa no homogénea.

La ganancia de calor por la envolvente se define como el total de la suma de las ganancias o pérdidas de calor por radiación más las ganancias o pérdidas de calor por conducción -el fenómeno de la convección se considera para el cálculo del comportamiento térmico de los materiales mediante el uso del coeficiente de convección exterior e interior-, se calcula con la siguiente expresión²⁵:

$$\phi_p = \phi_{pc} + \phi_{ps} \quad (35)$$

Donde:

ϕ_p = Ganancia de calor por la envolvente del edificio proyectado para uso habitacional

ϕ_{pc} = Ganancia de calor por conducción por las partes opacas y no opacas de la envolvente del edificio proyectado para uso habitacional

ϕ_{ps} = Ganancia de calor por radiación solar por las partes no opacas de la envolvente del edificio proyectado para uso residencial

◆ **Ganancia de calor por conducción**

Es la suma de la ganancia por conducción a través de cada una de las componentes: ventanas techos y muros, se calcula con la siguiente ecuación²⁶:

$$\phi_{pc} = [K_j * A_j * (T_e - T_i)] \quad (36)$$

Donde:

²⁵ NOM-020-ENER-2011. Norma Oficial Mexicana, 2011.

²⁶ *Ibidem*.

ϕ_{pc} = Ganancia de calor por conducción por las partes opacas y no opacas de la envolvente del edificio proyectado para uso residencial para cada orientación

j = Las diferentes porciones que forman la parte de la componente en la envolvente. Cada una contiene un coeficiente global de transferencia de calor K.

K_j = Coeficiente global de transferencia de calor de cada porción ($\frac{W}{m^2 K}$)

A_j = Área de porción j para cada orientación (m^2)

T_e = Temperatura equivalente promedio, para cada orientación ($^{\circ}C$)

T_i = Valor de la temperatura interior del edificio para uso residencial ($^{\circ}C$)

◆ Ganancia de calor por radiación

Es la suma de la ganancia por radiación solar a través de cada una de las partes no opacas, para cada orientación, es calculada con la siguiente ecuación²⁷:

$$\phi_{ps} = [A_j * CS_j * FG_j * SE_j] \quad (37)$$

Donde:

ϕ_{ps} = Ganancia de calor por radiación solar a través de las partes no opacas de la envolvente del edificio proyectado para uso residencial

j = Las diferentes porciones que forman parte de la componente en la envolvente. Cada una tendrá un coeficiente de sombreado, un factor de ganancia de calor solar y un factor por corrección por sombreado exterior.

A_j = Área de la porción transparente para cada orientación

CS_j = Coeficiente de sombreado de vidrio para cada porción transparente, según la especificación del fabricante

FG_j = Ganancia de calor solar por orientación ($\frac{W}{m^2 K}$)

SE_j = Corrección por sombreado exterior para cada porción transparente

²⁷ Ibíd.

◆ **Criterio de aceptación**

El criterio de aceptación considera que la ganancia de calor a través de la envolvente del edificio proyectado para uso habitacional, sea menor o igual a la ganancia de calor a través de la envolvente del edificio proyectado de referencia para uso habitacional, ecuación mostrada a continuación²⁸:

$$\phi_P \leq \phi_r \quad (38)$$

3.1.3.1.1.3 Beneficios energéticos del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

Posterior a la evaluación térmica, se calcula el impacto energético anual que se tendría al dejar de utilizar los sistemas de aire acondicionado por la reducción de la carga de calor al interior del edificio en caso de que la carga de calor en el edificio proyectado fuera menor a la del edificio de referencia, se utiliza la metodología propuesta por Andrade y Morillón (2007) que considera lo siguiente:

- ◆ 3.5 kW térmicos = 1 Tonelada de refrigeración = 12,000 Btu/h²⁹; 1Btu/h = 0.09333 kWh eléctricos³⁰.
- ◆ Convertir la diferencia entre el edificio proyectado con el de referencia, solo si la cantidad de W térmicos del edificio proyectado es menor a los W térmicos de edificio de referencia, y convertir esa cantidad en Btu/h y obtener su equivalencia en kWh eléctricos.
- ◆ Cuantificar las horas de calor dentro del diagrama de isorrequisimientos (DDI), ese procedimiento se realiza por mes, el número de horas resultante se multiplica por el número de días del mes y al final se suman las horas de cada mes.
- ◆ Se multiplica el número total de horas con condiciones de calor en el DDI por la cantidad de kWh eléctricos de diferencia del edificio proyectado contra el de referencia, el resultado será el ahorro en kWh/año al evitar el uso de equipos de aire acondicionado.

²⁸ *Ibíd.*

²⁹ Yunus Cengel. Termodinámica, 4ta. edición, Ed. Mc. Graw Gil. Factores de conversión.

³⁰ Ernest Tricomi. ABC del aire acondicionado, Ed. Alfaomega, 2002.

3.1.3.1.2 Iluminación natural

La iluminación natural tiene como objetivo principal el uso racional de la energía en los edificios provocando un ahorro en el consumo de energía eléctrica. Para conocer la distribución de la luz natural exterior en los edificios, se requiere información medida o estimada de la iluminancia de la radiación solar, que muestra la disponibilidad de ese recurso en un determinado lugar. A continuación se describe inicialmente como evaluar el potencial de la iluminación natural mediante el conocimiento de la iluminancia exterior en superficies horizontales y verticales en su componente global y difusa, posteriormente se presenta una metodología para aprovechar la iluminación natural en los edificios de manera directa o indirecta y finaliza cuantificando algunos de los beneficios energéticos provocados por el uso de la iluminación natural.

3.1.3.1.2.1 Evaluación del potencial de la iluminación natural

Para el cálculo de la iluminancia global y difusa en superficies horizontales y verticales en diferentes orientaciones, se muestra el siguiente modelo utilizado para este trabajo:

- i. **Estimación de la eficacia luminosa.** La eficacia luminosa (K) de la luz natural se expresa como la relación entre la iluminancia (E en lx) y la irradiancia (I en W/m^2)³¹:

$$K = \frac{E}{I} \quad (39)$$

- i.i **Eficacia luminosa global.** Los datos requeridos para estimar la eficacia luminosa global son valores de irradiancia horaria y la temperatura de rocío horaria. Cuando no se cuenta con datos medidos de irradiancia, valores provenientes de modelos de predicción pueden ser aplicados con cierto grado de error de aproximación. La temperatura de rocío puede ser calculada a partir de la temperatura de bulbo seco y la humedad relativa. Estos datos se utilizan para calcular tres elementos fundamentales que determinan todas las condiciones de soleamiento desde cielo cerrado hasta cielo claro. Estos componentes son:

$$\epsilon = \frac{\frac{I_d + I_{bn}}{I_d} + kZ^3}{1 + kZ^3} \quad (40)$$

³¹ Muneer, T. (2004). Solar Radiation and Daylight Models.

- ◆ Claridad del cielo (ϵ) dada por (Pérez et al., 1990):

Donde I_d es la irradiancia difusa horizontal, el ángulo cenital (Z), en radianes, con variaciones de 0 y $\frac{\pi}{2}$, que es el complemento de la altura solar. La constante k tiene un valor de 1.041 para Z , en radianes.

La irradiancia directa normal (I_{bn}) se obtiene a partir de la directa horizontal (I_b)³²:

$$I_{bn} = \frac{I_b}{\cos Z} \quad (41)$$

- ◆ La brillantez del cielo (Δ) es calculada por (Pérez et al., 1990):

$$\Delta = I_d \frac{m}{I_{xt}} \quad (42)$$

Donde m es la masa óptica de aire y puede calcularse con la ecuación de Kasten (1993),

$$m = \frac{1}{\text{sen}\alpha + \frac{0.50572}{(\alpha + 6.07995)^{1.6364}}} \quad (43)$$

Donde la altura solar (α) se encuentra en grados. Es una ecuación aplicable a una presión estándar ρ_0 de 1013.25 mbares a nivel del mar. Para otras presiones la masa de aire es corregida mediante la siguiente expresión³³:

$$m' = m \left(\frac{\rho}{1013.25} \right) \quad (44)$$

Donde ρ es la presión atmosférica en mbar a una altura h en metros sobre el nivel del mar. La presión ρ puede ser estimada por la ecuación:

$$\frac{\rho}{\rho_0} = e^{0.0001184h} \quad (45)$$

Y la irradiancia extraterrestre (I_{xt}) se calcula con (Spencer, 1971):

$$I_{xt} = I_{sc}(1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \text{sen} \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \text{sen} 2\Gamma) \quad (46)$$

³² Duffie, J. and Beckman, W. Solar Engineering of Thermal Processes, 2006.

³³ Muneer, T. Solar Radiation and Daylight Models, 2004.

Expresión que tiene un valor en la constante solar (I_{sc}) de:

$$I_{sc} = 1387 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (47)$$

Y el ángulo diario en radianes (Γ) se calcula³⁴:

$$\Gamma = (n - 1) \frac{2\pi}{365} \quad (48)$$

- ◆ El contenido atmosférico de agua precipitable (W , en cm) está dado por (Wright et al., 1989):

$$W = e^{0.07 * T_{rocio} - 0.075} \quad (49)$$

Donde T_{rocio} es la temperatura de rocío horaria en °C. Puede ser estimada por la ecuación de Magnus-Tetens³⁵:

Para $0^\circ\text{C} < T < 60^\circ\text{C}$; $0.01 < HR < 1.0$; $0^\circ\text{C} < T_{rocio} < 50^\circ\text{C}$

$$T_{rocio} = \frac{b * \alpha(T, HR)}{a - \alpha(T, HR)} \quad (50)$$

$$\alpha(T, HR) = \frac{a * T}{b + T} + \ln HR \quad (51)$$

Con $a = 17.27$ y $b = 237.7$ °C y donde T , en °C, es la temperatura de bulbo seco y HR es la humedad relativa dada en %.

Estas componentes representan dos características diferentes de la atmósfera: las variaciones de ϵ expresan la transición desde un cielo totalmente cerrado hasta un cielo claro de baja turbulencia; las variaciones de Δ reflejan la opacidad / espesor de las nubes. Una vez calculados estos parámetros que establecen el estado del cielo, es posible calcular la eficacia luminosa global (K_g) mediante (Pérez et al., 1990):

$$K_g = a_i + b_i W + c_i \cos Z + d_i \ln \Delta \quad (52)$$

Los coeficientes a_i , b_i , c_i y d_i se pueden consultar (Tabla 3) para cada categoría de ϵ (Pérez et al., 1990).

³⁴ Duffie, J. and Beckman, W. Solar Engineering of Thermal Processes, 2006.

³⁵ Barenbrug, A.W.T., Psychrometry and Psychrometric Charts, 3rd Edition, Cape Town, S.A.: Cape and Transvaal Printers Ltd., 1974

La iluminancia horizontal global (E_g) se puede calcular con:

$$E_g = I_g * K_g \quad (53)$$

Tabla 3.2 Categorías de la claridad del cielo

Categoría	Tipo de cielo	Límite inferior	Límite superior
1	Cerrado	1.000	1.065
2		1.065	1.230
3		1.230	1.500
4		1.500	1.950
5		1.950	2.800
6		2.800	4.500
7		4.500	6.200
8	Claro	6.200	—

i.ii Eficacia luminosa difusa. El modelo para calcular la eficacia luminosa difusa (K_d) es el mismo que en el proceso para determinar la eficacia luminosa global (Pérez et al., 1990):

$$K_d = a_i + b_i W + c_i \cos Z + d_i \ln \Delta \quad (54)$$

Los valores que cambian son los coeficientes de a_i , b_i , c_i y d_i mismos que pueden ser consultados (Pérez et al., 1990), mientras que los valores de W , Z y Δ son calculados mediante las mismas ecuaciones de la eficacia luminosa global.

Posteriormente la iluminancia horizontal difusa (E_d) es calculada con:

$$E_d = I_d * K_d \quad (55)$$

ii. Estimación de la iluminancia exterior en superficies inclinadas. Mediante los modelos que se utilizan para esta parte del trabajo, es posible estimar la iluminancia exterior total recibida en superficies inclinadas como puede ser una ventana, tomando como base la iluminancia horizontal.

ii.i Iluminancia difusa en superficies inclinadas. La iluminancia difusa horaria en una superficie inclinada ($E_{\beta,d}$), con un ángulo de inclinación β , es obtenida en el modo simplificado del modelo de (Pérez et al., 1990), a través de la siguiente expresión:

$$E_{\beta,d} = E_d \left[\frac{1}{2} (1 - F_1)(1 + \cos \beta) + F_1 \frac{a}{b} + F_2 \sin \beta \right] \quad (56)$$

Donde los términos a y b están dados por:

$$a = \max(0, \cos\theta), b = \max(0.087, \cos Z)$$

El $\cos\theta$ es una función del tiempo que depende de la orientación de la superficie y se calcula con (Benford y Bock, 1939):

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\theta \cos\beta - \sin\beta \cos\theta \sin\beta \cos\gamma + \cos\delta \cos\phi \cos\beta \cos\omega + \cos\delta \sin\phi \sin\beta \cos\gamma \cos\omega + \cos\delta \sin\beta \sin\gamma \sin\omega \quad (57)$$

Los ángulos β y γ varían de acuerdo con la orientación e inclinación de la superficie:

Inclinación:

Superficie horizontal $\beta = 0^\circ$

Superficie vertical $\beta = 90^\circ$

Orientación:

Sur $\gamma = 0^\circ$

Norte $\gamma = 180^\circ$

Este $\gamma = 90^\circ$

Oeste $\gamma = 90^\circ$

Como se observa, estos ángulos no son restrictivos por lo que se puede especificar cualquier ángulo conforme a la superficie a analizar.

E_d es la iluminancia difusa horizontal. F_1 y F_2 son coeficientes que varían en función de las condiciones del cielo, y dependen a su vez de diferentes coeficientes mostrado en la siguiente ecuación (Pérez et al., 1990):

$$F_1 = \max(0, F_{11} + F_{12} * \Delta + F_{13} * Z) \quad (58)$$

$$F_2 = F_{21} + F_{22} * \Delta + F_{23} * Z \quad (59)$$

Los valores de estos coeficientes se encuentran en (Pérez et al., 1990), agrupados de acuerdo a la claridad del cielo (ϵ).

ii.ii Iluminancia global en superficies inclinadas. Para calcular la iluminancia global en superficies inclinadas, primero se debe calcular la iluminancia directa sobre una superficie horizontal (E_b); es la diferencia entre la iluminancia global horizontal (E_g) y la iluminancia difusa horizontal (E_d).

$$E_b = E_g - E_d \quad (60)$$

De la misma forma que se calculo la irradiancia directa normal a partir de la irradiancia directa horizontal, la iluminancia directa normal (E_{bn}), es obtenida mediante la iluminancia directa horizontal (E_b) a través de la siguiente ecuación:

$$E_{bn} = \frac{E_b}{\cos Z} \quad (61)$$

A continuación es calculada la iluminancia directa sobre superficies inclinadas ($E_{\beta,b}$) con:

$$E_{\beta,b} = E_{bn} \cos\theta \quad (62)$$

Donde θ es el ángulo de incidencia del Sol sobre la superficie inclinada considerada, y el $\cos\theta$ se calcula de la misma manera que la sección ii.i.

Para concluir, se suma el valor de la iluminancia difusa calculada en la sección anterior, la iluminancia global en una superficie inclinada ($E_{\beta,g}$):

$$E_{\beta,g} = E_{\beta,d} + E_{\beta,b} \quad (63)$$

3.1.3.1.2.2 Aprovechamiento de la iluminación natural

El aprovechamiento de la luz natural en los edificios, parte del conocimiento de los datos horarios de la irradiancia solar del sitio y de las sensaciones de frío, calor y confort proporcionados por el diagrama de isorequerimientos, debido a que se pueden determinar las horas en las que se requiere iluminación natural indirecta cuando se presentan condiciones de calor y confort por ejemplo con el uso de irradiación difusa, y en los periodos de frío se recomienda el uso de iluminación natural directa que hace la función de iluminar naturalmente y captar la radiación solar directa que permite ganancias de calor funcionando como sistema pasivo de climatización por ejemplo considerando la irradiación global, a continuación se presenta la Metodología para el aprovechamiento de la iluminación natural (Preciado y Morillón, 2010):

i. Estudio del bioclima.

ii. Aprovechamiento de la iluminación natural directa e indirecta

- ◆ Se establece un horario de análisis que comprende las horas con radiación solar (luz natural), para este trabajo se selecciona entre las 6 horas y las 18 horas (según datos del DDI y de la irradiancia solar horaria), intervalo que puede variar según la latitud.
- ◆ Determinar las horas en las que se presentan sensaciones de calor y confort en el DDI, así como seleccionar la iluminancia difusa horaria en determinada superficie vertical u horizontal que muestre los menores valores, y sobreponerlos en las horas de calor y confort del DDI, en este

intervalo de tiempo se propone utilizar la iluminación natural indirecta (iluminancia difusa) evitando así la radiación, mostrando que puede realizarse cualquier actividad visual inclusive con la iluminancia difusa que presenta los menores índices de iluminancia.

- ◆ Determinar las horas en las que se presenta sensación de frío en el DDI, así como seleccionar la iluminancia global horaria en determinada superficie vertical u horizontal que muestre los menores valores, y sobreponerlos en las horas de frío del DDI, en este intervalo de tiempo se propone iluminación natural directa (iluminancia global) provocando ganancias de calor que se pueden deducir en confort por la temporada de invierno (climatización pasiva), mostrando que puede realizarse cualquier actividad visual inclusive con la iluminancia global que presenta los menores índices de iluminancia.
- ◆ Posteriormente se cuantifican los recuadros –horas- de la iluminancia global y difusa horaria sobrepuestos en el diagrama de isorrequerimientos en periodo de frío, calor y confort, que cuentan con un valor de 0 klux en el horario seleccionado de 6:00-18:00 horas, donde el resto de los recuadros que cuentan con un valor diferente de 0 klux será el tiempo que se puede aprovechar (%) la iluminación natural de forma directa e indirecta en horas diurnas a lo largo del año, siendo 156 recuadros el 100% de tiempo.

3.1.3.1.2.3 Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural en los edificios

Para cuantificar energéticamente algunos de los beneficios de la iluminación natural que se pueden lograr en los edificios se sugiere seguir la siguiente guía:

- ◆ Se requiere conocer el horario promedio mensual en que es utilizada la iluminación artificial dentro del edificio de estudio cuando se dispone de iluminación natural –horas diurnas-, si se desconoce ese dato se propone considerar un horario de entre 6:00-9:00 horas (horario en el que puede requerirse la iluminación para realizar diversas actividades del usuario por comienzo de actividades laborales, escolares, domésticas, etc., lo recomendable es conocer el tipo de actividades a desarrollar dentro del edificio para conocer si es necesaria la iluminación).
- ◆ Considerar las iluminancias horarias en cualquier componente global o difusa en superficies verticales y horizontales según el tipo de iluminación natural que se requiera (directa o indirecta), en el horario propuesto de 6:00 – 9:00 horas.

- ◆ Se contabilizan las horas que hay niveles de iluminancia con un valor >0 (klux) entre las 6:00-9:00 horas, ese cálculo se realiza por mes, el número de horas que salga en cada mes se multiplica por el número de días del mes y al final se suman las horas resultantes de cada mes.
- ◆ El número de horas total que se tiene iluminancia con valores >0 (klux) se multiplican por la potencia y número de focos que se está evitando utilizar con la iluminación natural.
- ◆ La cantidad resultante en Wh/año se convierte a kWh/año que será el ahorro obtenido.

Es preciso mencionar que si se conoce el horario promedio mensual en que se utiliza la iluminación artificial en horas diurnas en el edificio, se sustituye por el horario propuesto de 6:00 - 9:00 horas.

3.1.3.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón

3.1.3.1.3.1 Utilización del calentador solar de agua por línea base

Se requiere conocer el potencial del recurso solar así como la línea base por consumo final de gas, donde el calentamiento de agua representa un porcentaje de ese consumo final.

Para la selección de un equipo para calentamiento solar de agua, el usuario define, en litros, el volumen de agua que requiere calentar, a partir de la siguiente expresión:

$$L = (M)(C_p)(T_c - T_f) \quad (64)$$

Donde:

L = Cantidad de energía requerida en el agua caliente (kJ/día)

M = Cantidad de agua caliente requerida (lt/día)

C_p = Calor específico del agua (4.2 kJ/kg °C)

T_c = Temperatura del agua caliente requerida en el colector (55°C)

T_f = Temperatura del agua de la red pública del lugar

Una vez calculada la energía requerida en el agua caliente, se determina el tamaño del colector solar plano de cobre, utilizando la siguiente fórmula:

$$A = \frac{L}{(\eta_{solar})(I_{max})} \quad (65)$$

Donde:

A = Área del colector solar requerido (m)

L = Cantidad de energía que debe de contener el agua caliente (kJ/día)

η = Eficiencia del colector solar (%)

I solar max = Irradiación solar máxima diaria del lugar (kWh / m² / día)

Con el área del colector calculada, se procede a calcular el ahorro diario de energía, con la siguiente ecuación:

$$A_e = \frac{(A)(I_{prom})(\eta_{solar})}{\eta_{boiler}} \quad (66)$$

Donde:

A_e = Ahorro anual de energía (kWh/año)

A = Área del colector solar plano (m²)

I_{prom} = Irradiación solar promedio diaria (kWh/m²/día)

η_{solar} = Eficiencia del colector solar (%)

η_{boiler} = Eficiencia del boiler (%)

Además es necesario conocer datos geográficos del lugar como es latitud para orientar e inclinar correctamente el colector solar y que tenga un rendimiento mayor.

3.1.3.1.3.2 Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima

El calentamiento solar de agua con energía solar permite conservar recursos naturales como el gas natural o GLP, dependiendo del tipo de clima por ejemplo en un cálido húmedo o cálido seco puede no llegar a ser necesario en determinados horarios y meses, pero en climas como los semi fríos y templados puede reducir el consumo de fuentes naturales no renovables.

Se considera adicionalmente de la línea base por consumo final de gas para utilizar el CSA, las características del clima, a continuación se presenta una guía considerando el clima del lugar:

- ♦ Se toma como referencia la NADF-008-AMBT-2005³⁶, donde la temperatura del agua de la red pública es igual a la temperatura media anual, asimismo se

³⁶ Norma ambiental para el distrito federal NADF-008-AMBT-2005, que establece las especificaciones técnicas para el aprovechamiento de la energía solar en el calentamiento de agua en albercas, fosas de clavados, regaderas, lavamanos, usos de cocina, lavanderías y tintorerías.

propone considerar como base las temperaturas medias mensuales para conocer la temperatura del agua de la red a lo largo del año.

- ◆ Conocer las temperaturas medias mensuales y anuales del lugar a analizar.
- ◆ Considerar que la temperatura del agua de la red pública con sensación confortable para bañarse sea ≥ 25 °C.
- ◆ Se cuantifican los recuadros –temperaturas medias mensuales- con una temperatura ≥ 25 °C, siendo 12 recuadros el 100% del tiempo. Se define a partir de ese resultado el porcentaje de tiempo con temperaturas ≥ 25 °C que proporciona el clima del lugar donde es posible no utilizar gas o colectores solares para calentamiento de agua, estableciendo de cierta forma cuanta demanda tendría un CSA según las especificaciones del clima.

3.1.3.1.3.3 Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua

El ahorro anual de energía proporcionado por el uso del calentador solar por línea base lo multiplicamos por el número de días del año (kJ/año), si consideramos que el poder calorífico del GLP es de 26,727 kJ/lit GLP, el resultado de lit. GLP se convierte a kg GLP considerando un factor de conversión de 1lit. GLP igual a 0.54kg GLP³⁷.

Adicionalmente se orienta el colector solar plano hacia el sur por estar en latitud norte con una inclinación correspondiente a su latitud.

3.1.3.2 Aprovechamiento de la energía solar en forma activa

La mayoría de los recursos naturales utilizados para la generación de energía eléctrica no son renovables (petróleo, gas, carbón, etc.), aunado a ello los mayores consumos energéticos en los edificios es mediante el consumo de energía eléctrica con equipos de climatización, iluminación, computación, motores (bombas de agua, hidroneumáticos), etc., por ello la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos (energía solar aprovechada en forma activa) es una parcial solución que se puede implementar en los edificios como medida de conservación de los recursos no renovables, para cubrir las necesidades de una línea base por consumo final de energía eléctrica, aunque deben considerarse

³⁷ Ramos G. y Patiño A. Dimensionamiento, selección y beneficios del uso de calentadores solares de agua en el sector doméstico, Memorias de la 30 Semana Nacional de la Energía Solar, México, 2006.

antes otras medidas como el uso de la energía solar aprovechada con sistemas pasivos y uso de tecnología eficiente. Existen otras formas de aprovechar fuentes como el Sol, el viento y geotermia de forma pasiva, con refrigeradores por absorción, aerogeneradores y bombas de calor, entre otros.

3.1.3.2.1 Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos)

En esta etapa del método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios, se propone utilizar la energía solar en forma activa para la generación de energía eléctrica mediante el empleo de sistemas fotovoltaicos, para determinar la eficiencia en la generación del sistema se tienen que considerar principalmente los siguientes factores; el efecto de la irradiación solar y el efecto de la temperatura., con el fin de cubrir el consumo diario promedio de energía además que se tienen que considerar medidas de ahorro de energía.

3.1.3.2.1.1 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Es utilizado el dimensionamiento de un sistema fotovoltaico interconectado a la red, debido a que un sistema aislado requeriría de mayor inversión económica, el método seleccionado para este trabajo se basa en el cálculo del número de módulos necesarios en relación al consumo eléctrico del mes menos favorable.

El método para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos (Sánchez, 2015), se describe a continuación:

- i. **Información geográfica.** Conocimiento de la localización geográfica del lugar (latitud, longitud, altitud), así como, datos de irradiación solar horaria para cada mes del año.
- ii. **Información energética.** Se determina el tipo de carga (CA o CD) y el consumo de energía eléctrica diaria (Wh/día).
- iii. **Consumo eléctrico total diario.** Se obtiene dividiendo el consumo de energía eléctrica diaria (Wh/día) entre la eficiencia del inversor (%) por utilizar en el sistema:

$$\text{Consumo eléctrico total diario} = \text{ICE}/\eta_{\text{inv}} \quad (67)$$

- iv. **Cálculo del mes menos favorable.** Se obtiene dividiendo la irradiación global diaria de cada mes (kW/m²año) entre el consumo eléctrico total diario, seleccionando el que tenga mayor índice, el cual representa el mes menos favorable:

$$\text{CMMF} = (\text{irradiación global diaria/mes})/\text{C elect/mes} \quad (68)$$

v. Elección de tipo de panel fotovoltaico. Se selecciona un modelo fotovoltaico, enunciando las siguientes características:

- ◆ P mod potencial nominal
- ◆ V máx voltaje máximo
- ◆ I máx corriente máxima
- ◆ Icc corriente de corto circuito
- ◆ Vca voltaje de circuito abierto

vi. Cálculo del número de módulos y tipo de arreglo. El número de módulos fotovoltaicos se obtiene con la división del cálculo del mes menos favorable entre la potencia total del tipo de panel fotovoltaico, redondeando el resultado siempre hacia arriba:

$$\text{Núm módulos} = \text{CMMF/P mod} \quad (69)$$

Para calcular el número de módulos conectados en serie, se divide el voltaje del sistema entre el voltaje del módulo, con el siguiente criterio para el voltaje del sistema: < 3000 W = 12 volts, > 3000 W = 24 volts:

$$\text{Núm mod serie} = \text{Vsist/Vmod} \quad (70)$$

Para calcular el número módulos conectados en paralelo se divide el número total de módulos entre el número de módulos conectados en serie:

$$\text{Núm mod paralelo} = \text{núm módulos/núm mod serie} \quad (71)$$

vii. Cálculo de parámetros eléctricos del SF

- ◆ Potencia total SF = (núm módulos)*(potencia total módulo) (72)
- ◆ Voltaje máximo = (voltaje máximo módulo)*(núm mod serie) (73)
- ◆ Corriente máxima = (corriente máxima módulo)*(núm mod paralelo) (74)
- ◆ Corriente total de corto circuito = (ICC módulo)*(núm mod paralelo) (75)
- ◆ Voltaje total de circuito abierto = (Vca módulo)* (núm mod serie) (76)
- ◆ Voltaje generación = (Vmod)* (núm mod serie) (77)

3.1.3.2.1.2 Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos

Para conocer los beneficios energéticos por el uso de sistemas fotovoltaicos en los edificios se requiere conocer la energía neta generada anualmente por el SFV. Se obtiene multiplicando la potencia total del SFV por la irradiación global diaria; el resultado se multiplica por el porcentaje de eficiencia del inversor para obtener la energía neta generada para un día en un mes determinado:

$$\text{ENG (día)} = ([\text{PTSF}] * [\text{irradiación global diaria}]) * (\text{inv \%}) \quad (78)$$

Para obtener la energía neta generada al mes, se multiplica la energía neta generada en un día (ENG [día]) por el número de días del mes correspondiente, esta operación se repite para cada mes.

$$\text{ENG (mes)} = \text{ENG (día)} * (\text{núm días del mes}) \quad (79)$$

La suma de la energía neta generada de cada mes, será la energía neta generada por el SFV anualmente:

$$\text{ENG (año)} = \sum \text{ENG (c/mes)} \quad (80)$$

Considerando que el sistema fotovoltaico se encuentra interconectado a la red, la energía que genere será exportada directamente a la red general.

Adicionalmente se orientan los módulos fotovoltaicos hacia el sur por estar en latitud norte con una inclinación correspondiente a su latitud, aunque este dato puede variar según las necesidades que se tengan en el edificio de estudio.

3.2 Balance de energía

Para esta fase del trabajo se efectúa un balance de energía en el que interactúan por un lado los ahorros de energía utilizando la iluminación natural, calentamiento solar de agua, climatización pasiva (control solar), correcta selección de materiales de construcción del edificio y generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos (**generación de energía**) contra la **demanda de energía** provocada por el uso de aparatos eléctricos, luminarias y gas para el calentamiento de agua. Mediante la expresión de Sartori et al. (2010), se tiene que la diferencia de la demanda de energía menos la energía generada es mayor o igual a cero:

$$\text{Nivel de Sust. Energética} = \text{Demanda de Energía} - \text{Generación de Energía} \geq 0 \quad (81)$$

Con un valor negativo en el resultado se tiene que las medidas de generación de energía térmica, lumínica y fotovoltaica propuestas, no son lo suficientes como para alcanzar la sustentabilidad energética, se recomienda realizar ajustes en la generación de energía solar con sistemas pasivos y activos, con un resultado igual a cero es aprobatoria la sustentabilidad energética alcanzando un Net Zero Energy mientras que con un resultado mayor a cero se medirá el excedente que se logra de energía (Plus Energy).

3.2.1 Beneficios ambientales

Para esta etapa, a partir del conocimiento del consumo final de energía promedio de esa región según el tipo de uso que se le dé al edificio se pueden calcular las emisiones de CO₂ (Gas de efecto invernadero) mitigadas por definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios al considerar el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, utilizando un factor de conversión para generación de electricidad de 0.385 kgCO₂ equivalentes por kWh así como se considera un factor de conversión por el uso de GLP de 0.234 kgCO₂ por kWh/kg³⁸.

³⁸ Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Aragón, España, 2012.

4.0 Casos de estudio

La validación del método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios que comprende el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, se aplicó en las ciudades con los climas más representativos de la República Mexicana: cálido seco, templado y cálido húmedo correspondientes a Cd. Juárez, Texcoco y Playa del Carmen respectivamente.



Figura 4.1 Clasificación de zonas climáticas y ciudades donde se validará la propuesta metodológica. Fuente: Bases para el programa MDL de desarrollo habitacional sustentable en México (Morillón, 2008)

4.1 Entorno con clima Templado: Texcoco, Estado de México

En este apartado se lleva a cabo la aplicación del método en un caso de estudio para una vivienda de interés social ubicada en Texcoco, Estado de México, clima templado.

4.1.1 Información general

En esta parte del método se requiere conocer datos generales y específicos del entorno, como son: clima, localización geográfica, del usuario y del edificio –Línea base y usos finales de la energía-.

- i. **Localización geográfica.** Para obtener datos geográficos del lugar se toma como fuente Google Earth.
 - a. Latitud: 19° 30' 21.74" Norte
 - b. Longitud: 98° 52' 59.34" Oeste
 - c. Altura sobre nivel del mar: 2257 metros

ii. **Información del clima.** Se deben conocer las principales variables que intervienen en la parte climatológica de una región las cuales son: temperatura del aire, humedad relativa, radiación solar y viento.

a. **Temperatura del aire.** La información de la temperatura se obtiene de una base de datos preferentemente de alguna estación meteorológica, para Texcoco se cuenta con una base de treinta años de información obtenida de las Normales Climatológicas por el S.M.N., considerando las temperaturas máximas, mínimas y medias promedio mensuales (Figura 4.2). La temperatura media anual se encuentra en los 15.6 °C, así como la temperatura máxima promedio registrada se da en el mes de abril con 27.6 °C, mientras que la temperatura mínima promedio se registra en diciembre y enero siendo así los meses más calurosos y fríos respectivamente de esta región.

SERVICIO METEOROLÓGICO NACIONAL													
NORMALES CLIMATOLÓGICAS													
ESTADO DE: MEXICO	PERIODO: 1981-2010												
ESTACION: 00015125 TEXCOCO (DGE)	LATITUD: 19°30'20" N.			LONGITUD: 098°52'55" W.				ALTURA: 2,250.0 MSNM.					
ELEMENTOS	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	ANUAL
TEMPERATURA MAXIMA													
NORMAL	23.1	24.4	26.6	27.6	27.4	25.7	24.0	24.3	24.1	24.3	24.2	23.7	25.0
MAXIMA MENSUAL	26.0	26.6	30.5	31.3	32.0	29.7	26.6	26.4	26.8	26.6	26.4	26.6	
AÑO DE MAXIMA	1982	1991	1991	1984	1983	1983	1983	1982	1982	1984	1985	2007	
MAXIMA DIARIA	30.0	31.0	34.0	35.0	38.0	39.0	30.0	30.5	32.0	37.0	31.0	31.0	
FECHA MAXIMA DIARIA	21/2010	22/2007	28/1984	23/1983	02/1983	04/2007	07/1982	25/1982	30/1982	07/1981	11/1985	09/2009	
AÑOS CON DATOS	20	18	18	19	17	18	18	18	17	19	19	18	
TEMPERATURA MEDIA													
NORMAL	12.5	13.7	15.7	17.6	18.0	17.7	16.6	16.7	16.3	15.5	13.9	12.8	15.6
AÑOS CON DATOS	20	18	18	19	17	18	18	18	17	19	19	18	
TEMPERATURA MINIMA													
NORMAL	2.0	3.0	4.8	7.5	8.7	9.8	9.3	9.1	8.4	6.7	3.6	2.0	6.2
MINIMA MENSUAL	-1.4	-0.9	1.9	3.9	4.1	3.9	3.6	3.6	3.5	3.0	-0.3	-0.7	
AÑO DE MINIMA	1986	1983	1983	2005	2005	2005	2005	2005	2005	2005	1981	1984	
MINIMA DIARIA	-7.0	-5.0	-5.5	-1.0	2.0	2.5	3.0	3.0	-1.0	-5.0	-5.5	-6.0	
FECHA MINIMA DIARIA	14/1986	23/1989	11/1989	03/1985	31/1982	01/1984	04/2005	18/2005	05/2007	13/1985	06/1982	21/1982	
AÑOS CON DATOS	20	18	18	19	17	18	18	18	17	19	19	18	

Figura 4.2 Datos de temperaturas máximas, medias y mínimas promedio mensuales, para Texcoco de Mora, Estado de México

Fuente: Normales Climatológicas por el S.M.N.

b. **Humedad relativa.** Cuando no se cuenta con alguna estación meteorológica que proporcione datos de la humedad relativa, se puede recurrir al uso del software Biosol, mismo que al proporcionar las temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales genera datos de humedades relativas máximas, medias y mínimas promedio mensuales (Tabla 4.1).

Tabla 4.1 Humedades relativas (%) máximas, mínimas y medias promedio mensuales para Texcoco de Mora, Estado de México.

Meses	HR max [%]	HR min [%]	HR med [%]
Enero	77	27	52
Febrero	74	26	50
Marzo	72	25	49
Abril	73	28	50
Mayo	76	31	54
Junio	82	37	60
Julio	83	40	61
Agosto	83	39	61
Septiembre	83	40	62
Octubre	78	33	56
Noviembre	75	28	52
Diciembre	75	26	50

Fuente: Elaborada en Biosol

Se observa que en los meses de junio a septiembre (temporada de lluvia) se cuenta con la humedad relativa media con valores mayores que oscilan entre los 60% y 62%, mientras que para el resto de meses varía entre 42% a 54%.

- c. **Viento.** Para conocer datos de la dirección de los vientos predominantes y velocidad del viento para Texcoco, Estado de México, se recurre a alguna estación meteorológica o de información existente como mapas del viento, para este trabajo se toma como fuente a WindFinder.com, estadísticas basadas en una serie de datos medidos entre el año 2011 al año 2016 diariamente entre las 7 de la mañana y las 7 de la tarde hora local (Fig. 4.3).

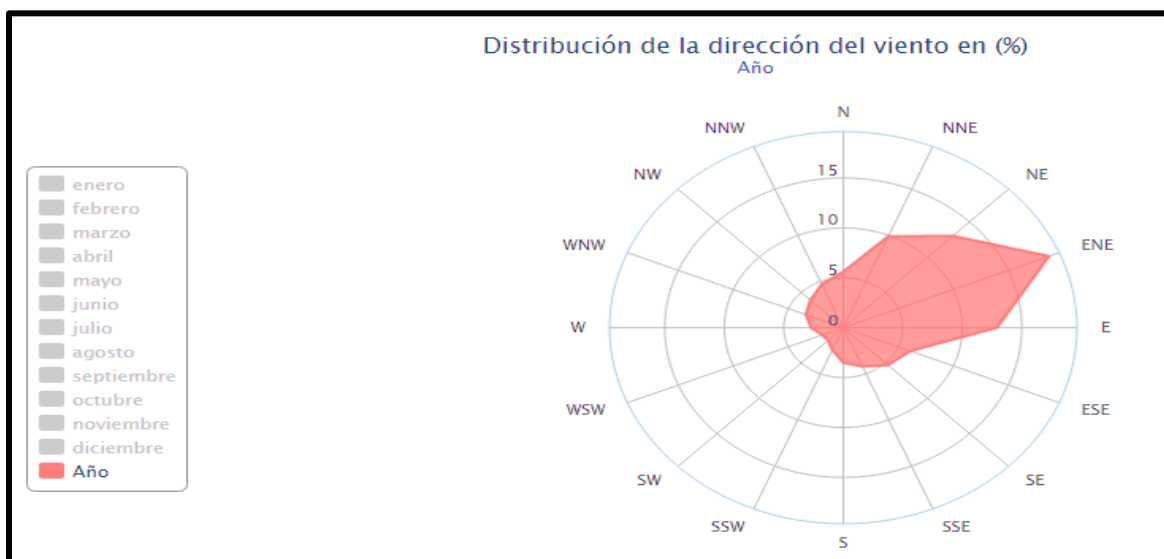


Figura 4.3 Rosa de los vientos promedio anual para Texcoco, Estado de México

Fuente: WindFinder.com, período 2011 – 2016.

Se presenta una velocidad promedio anual de 3 m/s, con dirección predominante del viento Este – Noreste a lo largo del año (Tabla 4.2).

Tabla 4.2 Dirección y velocidad (m/s) del viento promedio anual para Texcoco, Estado de México

Mes del año	Dirección del viento dominante	Velocidad media del viento m/s
Enero	Este-Noreste	3
Febrero	Este-Noreste	4
Marzo	Este-Noreste	4
Abril	Este-Noreste	4
Mayo	Este-Noreste	4
Junio	Este-Noreste	4
Julio	Este-Noreste	3
Agosto	Este-Noreste	4
Septiembre	Este-Noreste	3
Octubre	Este-Noreste	3
Noviembre	Este-Noreste	3
Diciembre	Este-Noreste	3
Anual	<i>Este-Noreste</i>	3

Fuente: Elaborada con datos de WindFinder.com, período 2011 – 2016

d. Irradiación solar. Existen métodos numéricos, gráficos, mediciones físicas e información existente para obtener los datos de irradiación solar. A partir de las ecuaciones 6, 7, 8, 9 y 10 (Ver sección 3.1.2.2.2), del Atlas de Irradiación en México de Almanza (2005), se calcula la irradiancia en superficies horizontales e inclinadas, posteriormente estos datos de irradiancia que vienen dados en MJ/m² son procesados en el programa Biosol, proporcionando valores horarios de la irradiación global y difusa promedio mensual, para superficies horizontales (techos, pisos, etc.) y superficies inclinadas (fachadas, ventanas, partesoles, etc.), dadas en unidades de W/m².

En el municipio de Texcoco, México, la cantidad de irradiación global horaria en superficie horizontal oscila entre los 5.8 kWh/m² * día para el mes de mayo siendo este el mes con mayor incidencia del recurso solar y de 4.13 kWh/m² * día para el mes de diciembre, presentándose en este mes la menor incidencia del recurso solar (Tabla 4.3).

Para la irradiación global horaria en superficie inclinada con un ángulo de inclinación de 90° orientada hacia el sur, fluctúa en los 4.71 kWh/m² * día para diciembre siendo este el mes con mayor incidencia del recurso solar así

como de 0.754 kWh/m² * día en el mes de mayo que presenta los menores índices de incidencia de irradiación global en superficie inclinada (Tabla 4.4).

Tabla 4.3 Irradiancia global en superficie horizontal (W/m²), para Texcoco, México

Mes	Irradiancia Global en Superficie Horizontal [W/m ²]											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
01:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06:00	0.00	0.00	0.00	34.29	58.43	64.54	56.46	31.47	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	67.58	103.13	143.79	179.59	198.33	195.63	189.50	162.84	137.07	96.04	66.65	53.33
08:00	224.93	269.47	316.19	347.41	356.86	343.11	340.17	314.51	300.64	253.69	224.35	204.59
09:00	392.16	443.11	492.94	516.49	514.68	489.26	490.09	467.27	468.29	418.42	392.07	366.61
10:00	540.59	595.65	646.56	661.86	649.36	613.62	618.00	598.60	613.97	563.22	541.00	511.06
11:00	642.85	700.12	751.12	760.20	740.07	697.22	704.14	687.43	713.12	662.42	643.62	610.81
12:00	679.31	737.26	788.20	794.97	772.07	726.70	734.53	718.84	748.27	697.69	680.21	646.42
13:00	642.85	700.12	751.12	760.20	740.07	697.22	704.14	687.43	713.12	662.42	643.62	610.81
14:00	540.59	595.65	646.56	661.86	649.36	613.62	618.00	598.60	613.97	563.22	541.00	511.06
15:00	392.16	443.11	492.94	516.49	514.68	489.26	490.09	467.27	468.29	418.42	392.07	366.61
16:00	224.93	269.47	316.19	347.41	356.86	343.11	340.17	314.51	300.64	253.69	224.35	204.59
17:00	67.58	103.13	143.79	179.59	198.33	195.63	189.50	162.84	137.07	96.04	66.65	53.33
18:00	0.00	0.00	0.00	34.29	58.43	64.54	56.46	31.47	0.00	0.00	0.00	0.00
19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaborada en Biosol

Tabla 4.4 Irradiancia global en superficie inclinada a 90° orientada hacia el sur, para Texcoco, México

Hora/Mes	Irradiancia Global en Superficie Inclinada [W/m ²]											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
01:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06:00	0.00	0.00	0.00	11.13	17.89	18.28	16.29	11.27	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	192.35	140.95	70.85	41.21	43.92	44.86	43.98	39.29	68.45	122.07	180.45	201.57
08:00	293.41	228.82	146.76	64.47	64.53	64.54	64.49	64.39	142.13	217.09	286.64	307.71
09:00	415.53	320.82	220.60	103.36	76.86	76.29	76.75	98.77	213.28	308.13	396.63	419.20
10:00	504.91	410.37	288.53	145.67	80.82	80.03	80.67	136.79	272.32	383.89	487.94	529.92
11:00	563.78	460.78	326.88	165.81	67.09	76.61	77.02	159.39	310.85	434.18	548.53	591.65
12:00	584.33	478.29	339.61	169.28	52.45	69.96	68.06	164.73	324.01	451.82	586.05	613.19
13:00	563.78	460.78	326.88	165.81	67.09	76.61	77.02	159.39	310.85	434.18	548.53	591.65
14:00	504.91	410.37	288.53	145.67	80.82	80.03	80.67	136.79	272.32	383.89	487.94	529.92
15:00	415.53	320.82	220.60	103.36	76.86	76.29	76.75	98.77	213.28	308.13	396.63	419.20
16:00	293.41	228.82	146.76	64.47	64.53	64.54	64.49	64.39	142.13	217.09	286.64	307.71
17:00	192.35	140.95	70.85	41.21	43.92	44.86	43.98	39.29	68.45	122.07	180.45	201.57
18:00	0.00	0.00	0.00	11.13	17.89	18.28	16.29	11.27	0.00	0.00	0.00	0.00
19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaborada en Biosol

iii. Línea base y principales usos finales de la energía

En esta parte del trabajo, se determinan los usos finales de la energía, con objetivo principal de identificar áreas donde se puedan implementar medidas de ahorro energético (Tabla 4.5).

Tabla 4.5 Uso final de la energía para una vivienda convencional, para la Ciudad de México

Concepto	Consumo energético	Porcentaje de uso final
Iluminación (kWh/año)	480	40
Refrigerador (kWh/año)	348	29
TV (kWh/año)	156	13
Electrodomésticos (kWh/año)	84	7
Plancha (kWh/año)	72	6
Lavadora (kWh/año)	60	5
Total (kWh/año)	1200	100
Gas LP (kgGLP/año)	388.8	----

Fuente: Morillón, 2009, Líneas base para la vivienda sustentable en México: GEI, Informe Técnico, Banco Mundial, México; Ceballos y Morillón, 2012, Metodología para la sustentabilidad energética: La vivienda Net Zero Energy, Tesis UNAM, p.75, México.

4.1.2 Diagnóstico

Con la información general recabada, es posible continuar con la validación del método y realizar el diagnóstico compuesto por un estudio del bioclima y de la radiación solar.

4.1.2.1 Estudio del Bioclima

Es procesada la información general para realizar un estudio del bioclima mediante la Metodología de evaluación y delimitación en las condiciones de confort higrotérmico³⁹, descrita a continuación:

i. Obtener información del clima. Para obtener las temperaturas y humedades relativas horarias, se utiliza el software Biosol que dentro de su programación cuenta con las ecuaciones del modelo de simulación de marcha diaria de Tejeda (2002) para calcular dichas variables horarias, con resultados suficientemente admisibles para la mayoría de aplicaciones del diseño bioclimático.

³⁹ Morillón Gálvez David. Atlas del Bioclima de México, Series de Investigación, UNAM, 2004.

Se procesan datos de temperatura y humedad relativa máxima y mínima promedio en el software Biosol.

Las temperaturas horarias, estarán ordenadas en doce columnas correspondientes a cada mes y 24 filas representando las horas del día, en donde se aprecia el comportamiento de la temperatura de forma horaria, mostrado en la Tabla 4.6:

Tabla 4.6 Temperatura horaria (°C), Texcoco, México

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Octubre	Noviembre	Diciembre
00:00	9.3	10.3	11.9	13.7	14.5	14.8	14.1	14.1	14.1	12.7	10.9	9.9
01:00	8.3	9.3	11.0	12.8	13.8	14.2	13.5	13.5	13.5	12.0	9.9	8.8
02:00	7.5	8.5	10.2	12.1	13.1	13.7	13.0	13.0	13.0	11.3	9.2	7.9
03:00	6.8	7.8	9.6	11.5	12.6	13.3	12.6	12.6	12.6	10.8	8.5	7.2
04:00	6.2	7.2	9.0	11.1	12.2	12.9	12.3	12.2	12.3	10.3	8.0	6.6
05:00	5.7	6.8	8.6	10.7	11.9	12.6	12.1	11.9	12.0	10.0	7.5	6.1
06:00	5.3	6.4	8.2	9.2	10.8	11.9	11.3	11.0	10.9	9.7	7.2	5.7
07:00	4.2	5.6	8.1	11.3	13.3	14.2	13.4	12.7	12.0	9.3	6.1	4.4
08:00	6.9	9.0	12.1	15.4	17.3	17.7	16.6	15.8	14.7	12.1	8.9	7.1
09:00	11.5	13.9	17.0	20.1	21.5	21.1	19.8	19.1	18.0	16.0	13.4	11.8
10:00	16.3	18.6	21.6	24.2	25.0	23.9	22.4	22.0	20.9	19.7	17.9	16.8
11:00	20.2	22.4	25.1	27.0	27.3	25.8	24.2	24.0	23.1	22.6	21.5	20.9
12:00	22.8	24.8	27.1	28.6	28.5	26.6	25.0	25.0	24.3	24.4	24.0	23.7
13:00	24.1	25.9	27.9	29.0	28.7	26.7	25.1	25.2	24.8	25.2	25.2	25.2
14:00	24.3	25.9	27.7	28.5	28.1	26.1	24.6	24.8	24.5	25.1	25.3	25.4
15:00	23.6	25.0	26.6	27.4	26.9	25.1	23.7	24.0	23.8	24.4	24.6	24.7
16:00	22.3	23.6	25.1	25.8	25.4	23.8	22.5	22.8	22.7	23.2	23.3	23.4
17:00	20.6	21.8	23.2	24.1	23.8	22.4	21.2	21.5	21.5	21.8	21.7	21.7
18:00	18.7	19.9	21.3	22.2	22.1	21.0	19.9	20.2	20.2	20.2	19.9	19.7
19:00	16.8	17.9	19.3	20.4	20.5	19.7	18.7	18.9	18.9	18.7	18.1	17.8
20:00	15.0	16.1	17.5	18.7	19.0	18.5	17.5	17.7	17.8	17.2	16.3	15.9
21:00	13.3	14.4	15.9	17.2	17.6	17.3	16.5	16.6	16.7	15.9	14.7	14.1
22:00	11.8	12.8	14.4	15.9	16.4	16.3	15.5	15.6	15.7	14.7	13.3	12.5
23:00	10.4	11.5	13.1	14.7	15.4	15.5	14.8	14.8	14.9	13.6	12.0	11.1

De igual forma que con las temperaturas horarias, las humedades relativas horarias, se ordenan en doce columnas correspondientes a cada mes y 24 filas representando las horas del día, en donde se aprecia el comportamiento de la humedad relativa horaria, mostrado en la Tabla 4.7:

Tabla 4.7 Humedad relativa horaria (%), Texcoco, México

Hora	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Sep	Octubre	Noviembre	Diciembre
00:00	64	62	61	63	67	73	74	73	73	67	63	62
01:00	66	64	63	65	68	74	76	75	75	69	65	64
02:00	68	66	65	66	70	76	77	76	77	71	67	66
03:00	70	68	66	68	71	77	78	77	78	72	69	68
04:00	71	69	67	69	72	78	79	79	79	74	70	69
05:00	73	70	68	70	73	79	80	79	80	75	71	71
06:00	73	71	69	73	76	81	82	82	83	75	72	71
07:00	76	73	69	68	70	74	76	77	80	77	75	74
08:00	70	65	60	59	60	64	66	68	71	69	68	68
09:00	58	54	50	48	49	54	56	57	61	58	57	57
10:00	47	43	40	39	40	46	48	49	52	48	46	46
11:00	38	34	32	32	35	40	43	43	45	40	37	36
12:00	31	29	27	29	32	38	40	40	41	36	31	30
13:00	28	26	26	28	31	38	40	39	40	33	29	27
14:00	28	26	26	29	33	39	42	40	41	34	28	26
15:00	29	28	29	31	36	42	44	43	43	36	30	28
16:00	32	32	32	35	39	46	48	46	46	39	33	31
17:00	36	36	36	39	43	50	52	50	50	43	37	35
18:00	41	40	40	43	48	54	56	54	54	47	41	39
19:00	46	44	45	47	52	58	60	58	58	51	46	44
20:00	50	49	49	51	55	62	63	62	62	55	50	48
21:00	54	53	52	55	59	65	67	65	65	59	54	52
22:00	58	56	55	58	62	68	69	68	68	62	57	56
23:00	61	59	58	61	64	70	72	71	71	65	60	59

ii. **Calcular la temperatura de confort.** Es calculada por medio de la fórmula propuesta por Auliciems (1990) y determina la zona media de confort en función de la temperatura del medio ambiente (Tabla 4.8):

$$T_n = 17.6 + (0.31) \cdot (T_{ma})$$

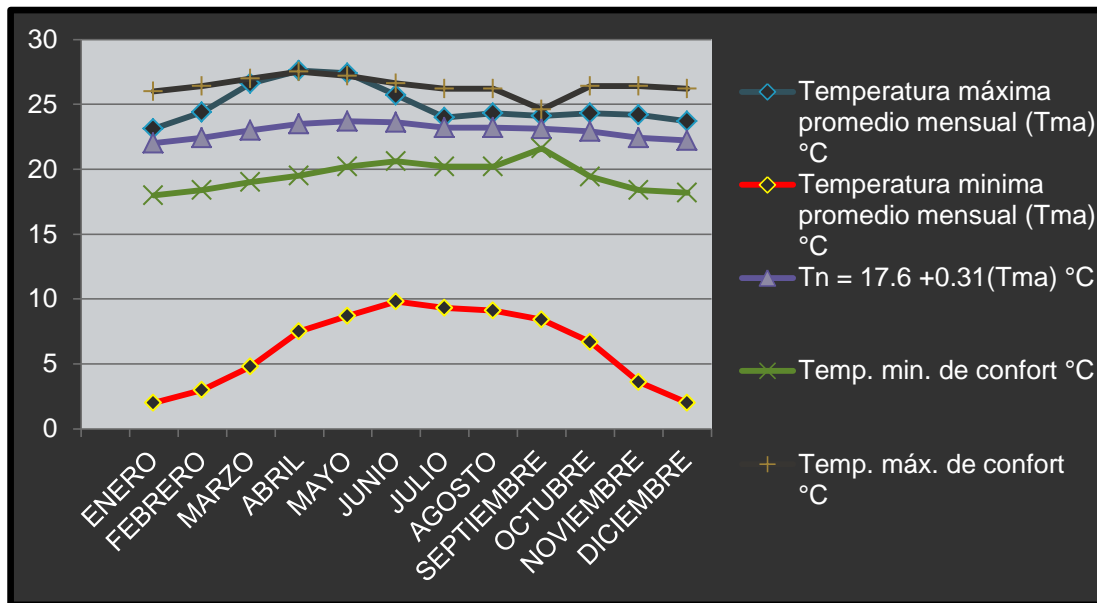
Dónde: T_n = temperatura neutra del mes y T_{ma} = temperatura media del mes

iii. **Determinar la amplitud de la zona de confort.** Se obtiene la diferencia de la temperatura promedio máxima y mínima del mes, da como resultado la oscilación de temperatura, esa oscilación se compara con la amplitud de la zona de confort, estableciendo los límites superiores e inferiores de la zona de confort (Tabla 4.8), por ejemplo en Mayo se tiene una oscilación de 18.2°C que al compararse en la Tabla 3.1 da como resultado 3.5 en amplitud de zona de confort, este procedimiento se realiza para cada mes.

La oscilación mayor encontrada es de 21.3 °C para el mes de diciembre, así como la menor diferencia se encontró en septiembre con 13.9°C. Se observa una zona de amplitud para todos los meses que se establece entre 3 y 4 (Tabla 4.8).

Tabla 4.8 Temperatura neutra y amplitud de la zona de confort mensual, para Texcoco

MES	Temperatura media mensual (T _{ma}) °C	Oscilación °C	T _n = 17.6 + 0.31(T _{ma}) °C	Zona de amplitud	Temp. min. de confort °C	Temp. máx. de confort °C
ENERO	14.2	20.5	22	4	18	26
FEBRERO	15.6	21.1	22.4	4	18.4	26.4
MARZO	17.5	21.1	23	4	19	27
ABRIL	19.2	19.9	23.5	4	19.5	27.5
MAYO	19.7	18.2	23.7	3.5	20.2	27.2
JUNIO	19.2	15.2	23.6	3	20.6	26.6
JULIO	18.2	14.1	23.2	3	20.2	26.2
AGOSTO	18.1	14.4	23.2	3	20.2	26.2
SEPTIEMBRE	17.9	13.9	23.1	3	21.6	24.6
OCTUBRE	17	16.7	22.9	3.5	19.4	26.4
NOVIEMBRE	15.6	19.6	22.4	4	18.4	26.4
DICIEMBRE	14.9	21.3	22.2	4	18.2	26.2



Gráfica 4.1 Comparación de las temperaturas máximas y mínimas promedio mensuales, respecto a las temperaturas neutras mensuales y su amplitud de la zona de confort
Fuente: Elaboración propia con datos de Tabla 4.8

En la Gráfica 4.1 se observa que las temperaturas máximas promedio mensuales con las temperaturas máximas de confort, solo muestran un acercamiento entre sus líneas de temperatura en temporada de primavera por incremento de las temperaturas máximas promedio mensuales, y las temperaturas mínimas promedio mensuales con las temperaturas mínimas de confort revelan una diferencia significativa, debido a que las temperaturas mínimas promedio mensuales promedian muchos de esos valores bajos en las horas de la madrugada cuando desciende por lo general mayormente la temperatura.

iv. Análisis de las condiciones de confort higrotérmico. A continuación se describe el proceso para utilizar la carta bioclimática de Olgay que debe realizarse para cada mes, como ejemplo se tomara el mes más frío que es enero, para Texcoco, México.

Análisis para el mes de Enero:

a. Datos

- ◆ Temperatura horaria (Tabla 4.6)
- ◆ Humedad relativa horaria (Tabla 4.7)
- ◆ Temperatura neutra (Tabla 4.8)

b. Adaptación

Es adaptada la carta bioclimática para Texcoco, México:

- ◆ Son procesados los datos de temperatura y humedad relativa horaria de enero en la plantilla, considerando el orden que lleven, por ejemplo que la temperatura de las 13 horas que es de 24.1°C (Tabla 4.6) vaya conectada con la humedad relativa de las 13 horas que es de 28% (Tabla 4.7), representando un solo punto dentro de la plantilla (Figura 4.4), este mismo procedimiento se realiza para las 24 horas.
- ◆ La temperatura neutra de enero que es de 22°C (Tabla 4.8), se sobrepone al 50% de la humedad relativa de la plantilla (Figura 4.4).
- ◆ Son cuantificados los puntos que representan la humedad relativa y temperatura horaria dentro de la plantilla, dependiendo en la zona que se encuentre cada punto será la sensación que se presenta de frío, calor o confort, por ejemplo a las 12 horas se cuenta con una temperatura horaria de 22.8°C (Tabla 4.6) y una humedad relativa horaria de 31% (Tabla 4.7), se encuentra dentro de la zona de confort (Figura 4.4), este mismo procedimiento se realiza para el resto de las horas.
- ◆ Es realizado un análisis de las condiciones higrotérmicas para Enero y las estrategias que recomienda Olgay para mantener o alcanzar la zona de confort higrotérmico. La sensación de confort se percibe desde las 11 a las 18 horas donde Olgay recomienda para conservar una sensación confortable mantenerse dentro de la línea de sombra. De las 19 horas a las 10 horas (tarde, madrugada y parte de la mañana) de los días de enero se presentan sensaciones de frío, esa condición es reversible según Olgay en donde propone irradiancia entre 70 a 490 W/m² para alcanzar la zona de confort (Figura 4.4).

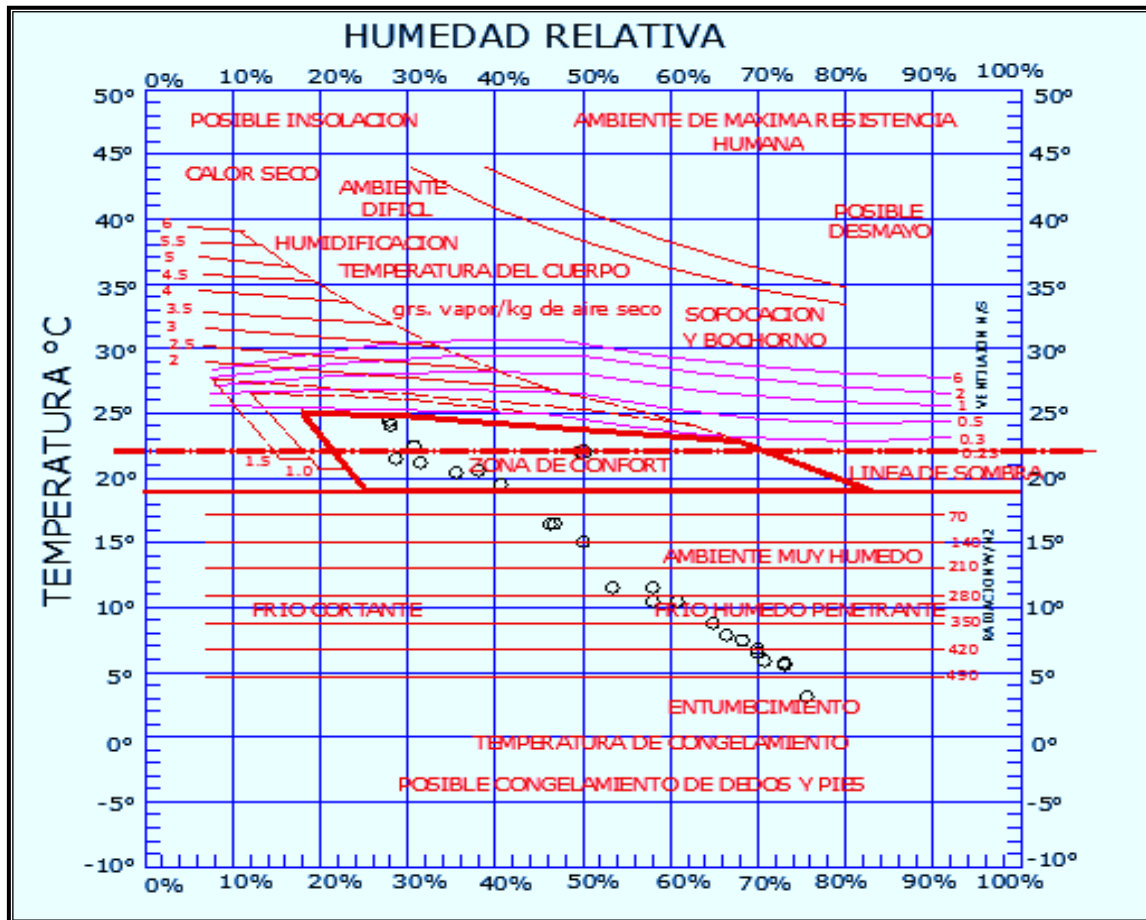


Figura 4.4 Carta bioclimática de Olgay, adaptada para Texcoco, México en el mes de Enero

Fuente: Elaboración con datos de temperatura, humedad relativa horaria y T_n

v. Análisis del diagrama de isorequerimientos. Las condiciones de sensación higrotérmica de frío, calor y confort horarias que proporciona la carta bioclimática de Olgay para cada mes, son vertidas en forma horaria en un diagrama que se conforma de 24 filas que constituyen las horas del día y 12 columnas representando los meses del año, al terminar de vaciar la información tendremos elaborado el diagrama de isorequerimientos para Texcoco, México (Figura 4.5).

Se muestra para el caso de estudio de Texcoco sensación de confort de forma constante entre las 11 y 18 horas, se presenta calor en los meses de abril y mayo (estación de la primavera), y se percibe una sensación de frío por la mañana y noche constante siendo los meses de noviembre, diciembre y enero (fin del otoño y parte de invierno) los que presentan mayor cantidad de tiempo con sensación de frío (Figura 4.5).

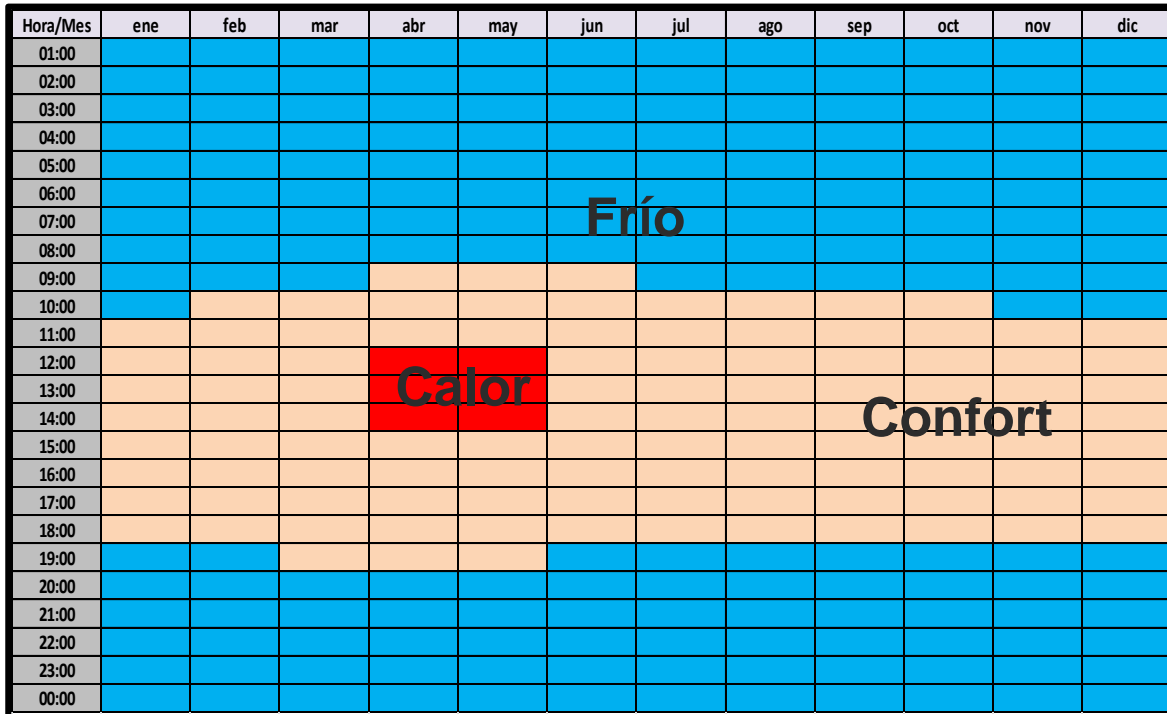


Figura 4.5 Diagrama de isorrequerimientos para Texcoco, México

Fuente: Elaboración propia mediante datos de las cartas bioclimáticas mensuales de Olgay

Es posible establecer estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares, con los datos horarios de sensación higrotérmica que proporciona el diagrama de isorrequerimientos, que se presentan en apartados posteriores aprovechando la energía solar en forma pasiva con el uso de control solar, iluminación natural y materiales de construcción que mantengan o logren el confort higrotérmico dentro de los edificios además de reducir el consumo de energía convencional evitando el uso de aire acondicionado, calefacción e iluminación artificial.

4.1.2.2 Radiación solar

Mediante el estudio del comportamiento de la radiación solar, se establece la trayectoria del Sol y se evalúa el recurso solar, que se verá afectada por el tipo de clima y ubicación geográfica donde se realice, para este caso de estudio en Texcoco, México, es un clima templado.

4.1.2.2.1 Análisis de la incidencia solar: gráfica solar

En esta etapa del trabajo, se utiliza el software Biosol, es generada una serie de datos horarios mensuales del calculo del azimut y altura solar, utilizando como base de calculo las ecuaciones 2, 3, 4 y 5, obteniendo como resultado una gráfica solar equidistante representativa al azimut y altura solar correspondientes a la altitud ingresada del sitio, se obtiene la gráfica para ambos semestres del año, como ejemplo se muestra la gráfica solar del primer semestre del año que comprende de enero a junio (Figura 4.6).

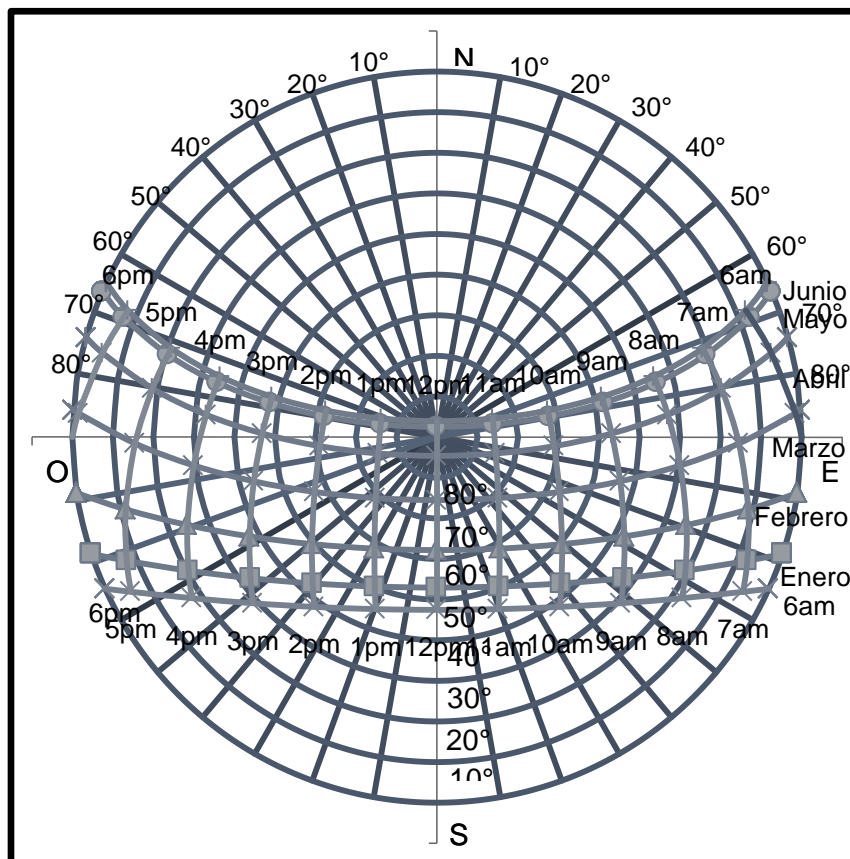


Figura 4.6 Gráfica solar equidistante para el primer semestre del año, para Texcoco, México

Fuente: Elaborada en Biosol

4.1.2.2.2 Evaluación del recurso solar: potencial

Es utilizado el programa Biosol para el cálculo de la irradiación solar horaria en superficies horizontales e inclinadas en forma global y difusa, como ejemplo se calculan datos para irradiancias globales en superficies horizontales e inclinadas.

- a. **Superficies horizontales.** Se procesan datos de información existente de irradiancia global horizontal promedio mensual (Tabla 4.9) de Almanza (2005) en el programa Biosol (Tabla 4.10).

Tabla 4.9 Irradiancia global horizontal promedio mensual (MJ/m^2), para Texcoco, México

MES	Irradiancia global horizontal promedio mensual (MJ/m^2)
ENERO	16
FEBRERO	18
MARZO	20
ABRIL	21
MAYO	21
JUNIO	20
JULIO	20
AGOSTO	19
SEPTIEMBRE	19
OCTUBRE	17
NOVIEMBRE	16
DICIEMBRE	15

Fuente: Atlas de la Irradiación en superficies horizontales e inclinadas en México (Almanza, 2005)

- b. **Superficies inclinadas.** Con los mismos datos de irradiancia global horizontal mensual promedio, es calculada la irradiación en superficies inclinadas con la diferencia que el programa Biosol tiene la opción para seleccionar el ángulo de orientación con respecto al sur: fachada sur, fachada norte, fachada este o fachada oeste, así como la selección del ángulo de inclinación de la superficie con respecto a la horizontal: superficie horizontal, superficie vertical o grados de inclinación con respecto a la horizontal, como ejemplo se presenta la Tabla 4.11 con el cálculo de irradiancia con orientación al sur y ángulo de inclinación de una superficie vertical (90°).

Se observan niveles altos de irradiación para Texcoco, Estado de México, principalmente en su componente global en superficies horizontales mostrándose los mayores niveles en los meses de abril a agosto, datos que toman relevancia al momento de dimensionar y seleccionar los sistemas fotovoltaicos y calentadores solares de agua, así como para determinar el potencial de iluminación natural exterior, ganancias o pérdidas de calor en los materiales de construcción del edificio, etc., son algunas estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares que se proponen a continuación para conocer si al aplicarse en los edificios se alcanza un determinado nivel de sustentabilidad en los mismos.

Tabla 4.10 Irradiación global horizontal horaria (Wh/m²), Texcoco, México

Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
[MJ/m ²]	16	18	20	21	21	20	20	19	19	17	16	15
[Wh/m ²]	4444.48	5000.04	5555.60	5833.38	5833.38	5555.60	5555.60	5277.82	5277.82	4722.26	4444.48	4166.70
Hora	Irradiancia Global Horizontal [W/m ²]											
01:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06:00	0.00	0.00	0.00	34.29	58.43	64.54	56.46	31.47	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	67.58	103.13	143.79	179.59	198.33	195.63	189.50	162.84	137.07	96.04	66.65	53.33
08:00	224.93	269.47	316.19	347.41	356.86	343.11	340.17	314.51	300.64	253.69	224.35	204.59
09:00	392.16	443.11	492.94	516.49	514.68	489.26	490.09	467.27	468.29	418.42	392.07	366.61
10:00	540.59	595.65	646.56	661.86	649.36	613.62	618.00	598.60	613.97	563.22	541.00	511.06
11:00	642.85	700.12	751.12	760.20	740.07	697.22	704.14	687.43	713.12	662.42	643.62	610.81
12:00	679.31	737.26	788.20	794.97	772.07	726.70	734.53	718.84	748.27	697.69	680.21	646.42
13:00	642.85	700.12	751.12	760.20	740.07	697.22	704.14	687.43	713.12	662.42	643.62	610.81
14:00	540.59	595.65	646.56	661.86	649.36	613.62	618.00	598.60	613.97	563.22	541.00	511.06
15:00	392.16	443.11	492.94	516.49	514.68	489.26	490.09	467.27	468.29	418.42	392.07	366.61
16:00	224.93	269.47	316.19	347.41	356.86	343.11	340.17	314.51	300.64	253.69	224.35	204.59
17:00	67.58	103.13	143.79	179.59	198.33	195.63	189.50	162.84	137.07	96.04	66.65	53.33
18:00	0.00	0.00	0.00	34.29	58.43	64.54	56.46	31.47	0.00	0.00	0.00	0.00
19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaborada en Biosol

Tabla 4.11 Irradiación global horaria para superficie inclinada a 90° inclinada hacia el sur (Wh/m²), Texcoco, México

[Wh/m ²]	4524.30	3601.78	2446.86	1210.30	718.88	754.63	753.86	1161.99	2338.05	3382.52	4386.44	4713.31
Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
01:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
02:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
03:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
04:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
05:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
06:00	0.00	0.00	0.00	11.13	17.89	18.28	16.29	11.27	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	192.35	140.95	70.85	41.21	43.92	44.86	43.98	39.29	68.45	122.07	180.45	201.57
08:00	293.41	228.82	146.76	64.47	64.53	64.54	64.49	64.39	142.13	217.09	286.64	307.71
09:00	415.53	320.82	220.60	103.36	76.86	76.29	76.75	98.77	213.28	308.13	396.63	419.20
10:00	504.91	410.37	288.53	145.67	80.82	80.03	80.67	136.79	272.32	383.89	487.94	529.92
11:00	563.78	460.78	326.88	165.81	67.09	76.61	77.02	159.39	310.85	434.18	548.53	591.65
12:00	584.33	478.29	339.61	169.28	52.45	69.96	68.06	164.73	324.01	451.82	586.05	613.19
13:00	563.78	460.78	326.88	165.81	67.09	76.61	77.02	159.39	310.85	434.18	548.53	591.65
14:00	504.91	410.37	288.53	145.67	80.82	80.03	80.67	136.79	272.32	383.89	487.94	529.92
15:00	415.53	320.82	220.60	103.36	76.86	76.29	76.75	98.77	213.28	308.13	396.63	419.20
16:00	293.41	228.82	146.76	64.47	64.53	64.54	64.49	64.39	142.13	217.09	286.64	307.71
17:00	192.35	140.95	70.85	41.21	43.92	44.86	43.98	39.29	68.45	122.07	180.45	201.57
18:00	0.00	0.00	0.00	11.13	17.89	18.28	16.29	11.27	0.00	0.00	0.00	0.00
19:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
20:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
21:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
22:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
23:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
00:00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaborada en Biosol

4.1.3 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares

Con información recabada del entorno y mediante el diagnóstico que comprende el estudio del bioclima y de la radiación solar, es factible establecer las estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares expuestas en el capítulo anterior, aprovechando la energía solar en forma pasiva y activa.

4.1.3.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva

4.1.3.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas

En este apartado se proponen estrategias de adecuación climática en la construcción mediante el control solar y materiales de construcción adecuados al tipo de clima del lugar de estudio.

4.1.3.1.1.1 Control solar

Una de las estrategias para climatizar pasivamente es aprovechando o evitando la energía solar a través del control solar, en esta etapa es utilizado el modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios (Mejía y Morillón, 2004) presentado a continuación:

- i. Contabilizar en el diagrama de isorrequerimientos las horas de frío, calor y confort para ambos semestres del año, con un horario que se establece entre las 6 horas y las 18 horas, por ejemplo en enero se cuenta con 5 horas de frío mismas que se multiplican por el número de días que tiene el mes analizado (31 días), da un resultado de 155 horas con frío para el mes de enero, se realiza el mismo procedimiento para las horas de confort y calor. Finalmente se suman las horas en las que se requiere soleamiento T1 (frío) y protección solar T2 (calor y confort) para ambos semestres (Figura 4.7).

Tabla 4.12 No. de horas que requieren ganancia de calor (T1) o protección (T2), semestre Enero-Junio

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Total
T1	155	112	124	90	93	90	664
T2	248	252	279	300	310	300	1689

Tabla 4.13 No. de horas que requieren ganancia de calor (T1) o protección (T2), semestre Julio-Diciembre

Mes	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
T1	124	124	120	124	150	155	797
T2	279	279	270	279	240	248	1595

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00	FRÍO						FRÍO					
07:00	FRÍO						FRÍO					
08:00	FRÍO						FRÍO					
09:00	FRÍO						FRÍO					
10:00	FRÍO						FRÍO					
11:00	FRÍO						FRÍO					
12:00	FRÍO						FRÍO					
13:00	CONFORT			CALOR			CONFORT					
14:00	CONFORT			CALOR			CONFORT					
15:00	CONFORT			CALOR			CONFORT					
16:00	1ER SEMESTRE						2DO SEMESTRE					
17:00	1ER SEMESTRE						2DO SEMESTRE					
18:00	1ER SEMESTRE						2DO SEMESTRE					

Figura 4.7 Diagrama de isorrequerimientos para ambos semestres, Texcoco, México

ii. La información obtenida en el paso anterior se traslada a las gráficas solares para cada semestre, se marca en color rojo las horas que requieren protección solar (T2, periodo con calor y confort), se muestra como ejemplo la gráfica solar del primer semestre (Figura 4.8).

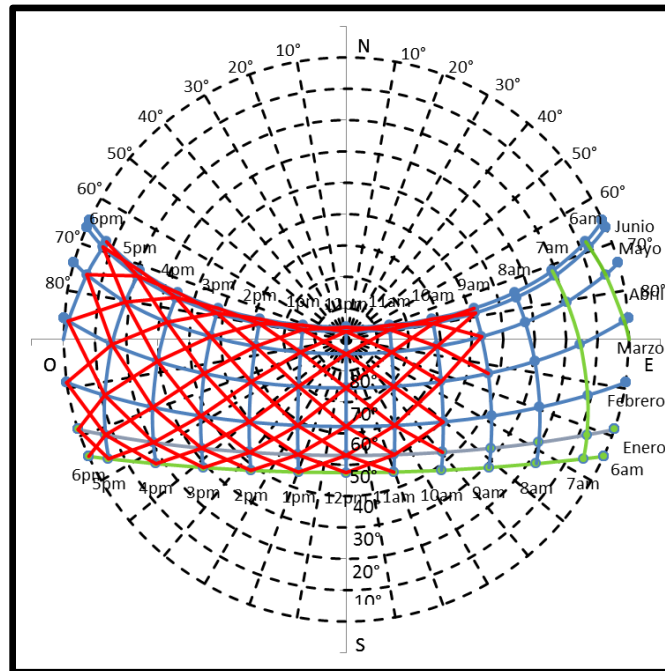


Figura 4.8 Gráfica solar estereográfica mostrando horas que se requiere protección solar (marcado en color rojo), para Texcoco (1° Semestre Enero-Junio)

iii. Dibujar mascarillas de sombreado que representa el alero de protección desde los 0°, sobreponiendo la mascarilla de sombreado sobre la gráfica solar para ambos semestres, se contabilizan las horas con requerimiento de sombra (T2) que quedan fuera del alero (K), para sobreponer en las gráficas solares y las que requieren asoleamiento (T1) que quedan fuera del alero (L), se presenta el

ejemplo para la mascarilla de sombreado del semestre que comprende enero-junio a 0° (Figura 4.9), se realiza el mismo procedimiento de 10 en 10 ° hasta llegar a 90° para aleros y partesoles (de 0° a 50°) en ambos semestres para las cuatro principales orientaciones (norte, sur, este y oeste).

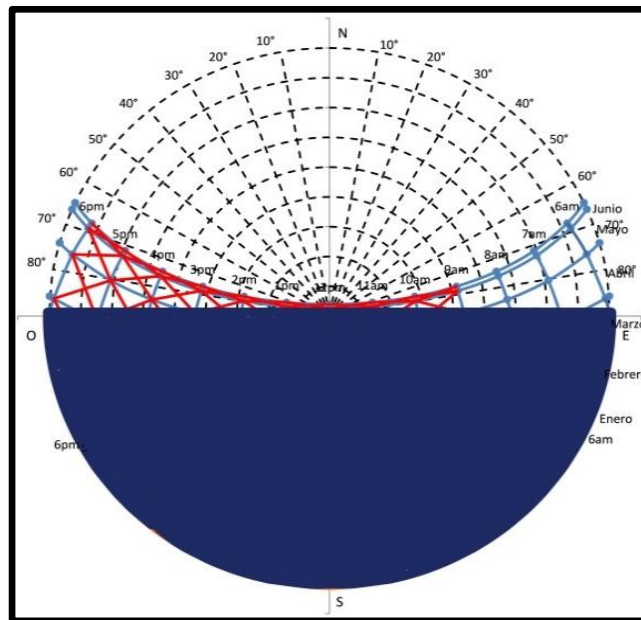


Figura 4.9 Mascarilla de sombreado sobre la gráfica solar para un alero a 0° con orientación sur, semestre enero-junio, para Texcoco

iv. Posteriormente se calcula la eficiencia del alero para el periodo de calor, con la siguiente fórmula: $EPC = 1 - (K/T2)$ (Ec. 11) y la eficiencia para el periodo de frío con: $EPF = L/T1$ (Ec. 12). Se realiza el mismo procedimiento con las mascarillas de 10°, 20°, 30°, 40°, hasta obtener toda la información acerca de la eficiencia de los aleros con diferentes ángulos de protección.

v. Calcular la eficiencia global de los elementos de control durante todo el año (ED), es decir, la eficiencia ponderada.

vi. El ángulo óptimo de protección solar para cada orientación es el correspondiente al valor máximo de la eficiencia ponderada del alero (ED), correspondiente al punto en que se cruzan las eficiencias para los periodos de calor (EPC) y de frío (EPF).

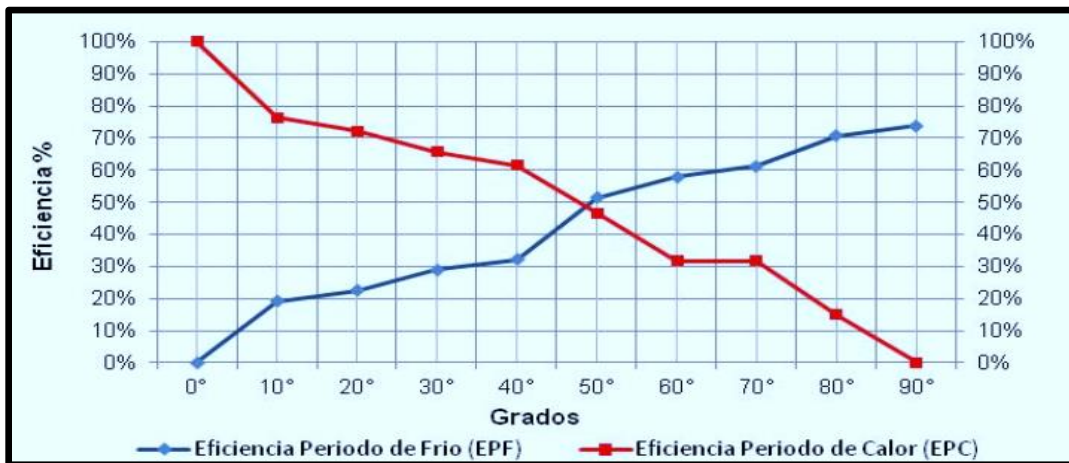
Se presenta como ejemplo del cálculo de la eficiencia en periodo de calor y de frío para un alero con orientación sur del semestre enero-junio de nuestro caso de estudio (Tabla 4.14), el mismo procedimiento se realiza para ambos semestres.

Tabla 4.14 Eficiencia de alero a distintos ángulos, orientación sur, para Texcoco

EFICIENCIA DEL ALERO							
Fachada	Horas en que se requiere soleamiento	Horas en que se requiere sombra	Ángulo del alero [°]	Horas en que se requiere sombra y no hay protección	Eficiencia periodo de calor [%]	Horas en que se requiere Sol y no hay protección	Eficiencia en periodo frío [%]
Sur	T1	T2		K	$EPC=1-(K/T2)$	L	$EPF=L/T1$
	1461	3284	40	425	87.06	440.5	30.15
			50	813	75.24	635	43.46
			60	1120	65.90	742	50.79
			70	1424	56.64	988	67.62
			80	1880.5	42.74	1018	69.68
			90	2541	22.62	1033	70.70

Fuente: Elaborada en Biosol

En la Gráfica 4.2 se observan dos curvas, una para la eficiencia en periodo frío y otra para la eficiencia en periodo de calor y confort. La eficiencia ponderada es de 49% así como el valor del ángulo óptimo de protección solar es de 49°, mismo procedimiento se aplica en ambos semestres, seleccionando el ángulo óptimo con mayor eficiencia para ambos semestres.



Gráfica 4.2 Eficiencia ponderada y ángulo óptimo del alero, con orientación sur, para Texcoco, semestre enero-junio

vii. Este procedimiento se aplica para cada una de las orientaciones, hasta obtener la información de los ángulos óptimos de protección solar para los aleros y partesoles de cada caso, se muestran los resultados en la Tabla 4.15:

Tabla 4.15 Ángulos óptimos para control solar

Dispositivo / Orientación	Norte	Este	Sur	Oeste
Alero	76°	60°	49°	10°
Partesol	10°	20°	10°	0°

Fuente: Método de modelo de diseño y evaluación solar (Mejía y Morillón, 2004)

Como se observa en la Tabla 4.15, la orientación oeste es la menos favorable debido a la gran cantidad de irradiación solar que incide en esa fachada a lo largo del año, por ello no se recomienda colocar ventanas en esa orientación, por otro lado la orientación norte se presenta como la más favorable con un ángulo de 76°, debido a que en pocos meses del año se recibe irradiación directa en esa fachada. El diseño y construcción de los ángulos óptimos de las protecciones solares para las diferentes fachadas es una medida de climatización pasiva que puede reducir las ganancias solares en los edificios de manera considerable y aprovechar la radiación solar cuando es requerida.

4.1.3.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio

Se lleva a cabo la evaluación térmica del edificio proyectado con la selección adecuada de materiales de construcción y sistemas constructivos disponibles en el lugar de estudio para reducir ganancias y/ pérdidas térmicas por conducción y convección, asimismo, se toman en cuenta los ángulos óptimos de control solar y se propone el uso de filtros solares en las ventanas para reducir las ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación en superficies transparentes de la envolvente, se realiza lo siguiente:

- i. Definir las generalidades del edificio proyectado.** Es seleccionada la vivienda de interés social tipo económica para este caso de estudio (Figura 4.10) -para el 2010 había una cantidad total de 28, 513, 038 viviendas en México de acuerdo a la Sociedad Hipotecaria Federal-.

La vivienda de interés social tipo económica cuenta con 59 m² de superficie, ubicada de norte a sur, cuenta con una sala-comedor, una cocina, un baño y medio, dos recamaras, un patio de servicio y un cajón de estacionamiento.

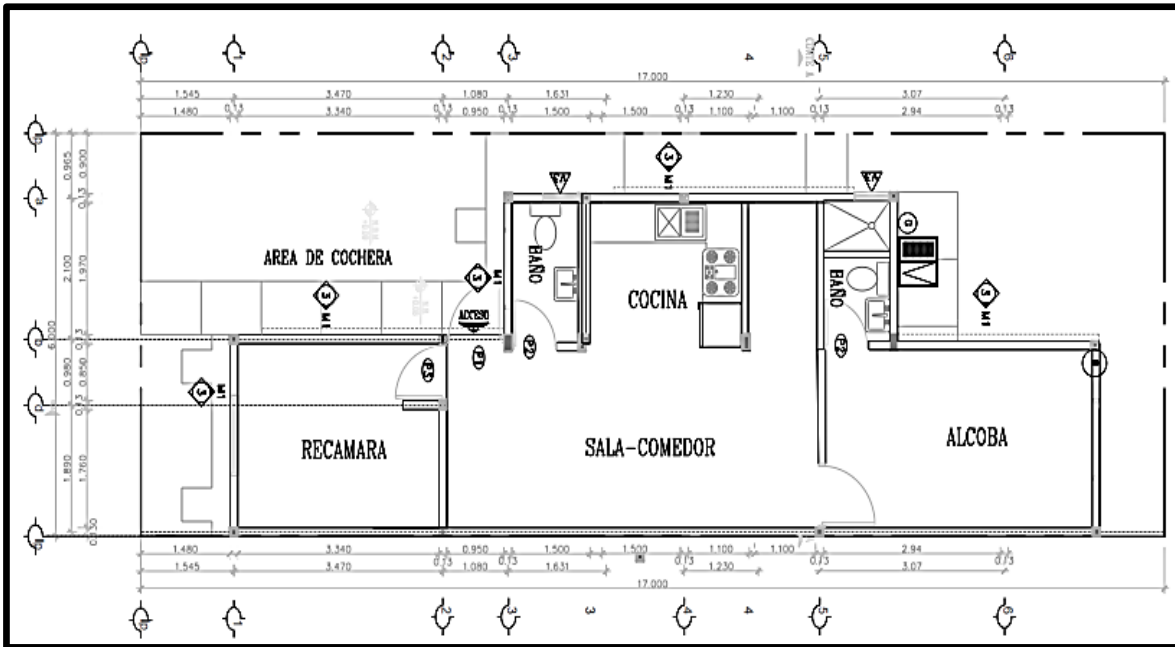


Figura 4.10 Vivienda de interés social tipo económica, planta arquitectónica

Antes de definir los materiales y sistema constructivo seleccionados para el caso de estudio, se presentan los materiales de uso común en techos y muros de las viviendas en México en la Tabla 4.16:

Tabla 4.16 Materiales de construcción usados en las viviendas de México⁴⁰

Muros	Techos
Material de desecho	Material de desecho
Lámina de cartón	Lámina de cartón
Lámina de asbesto o metálica	Lámina de asbesto o metálica
Carrizo, bambú o palma	Palma, tejamanil o madera
Embarro o bajareque	Teja
Madera	Losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería
Adobe	
Tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto	

De los distintos materiales utilizados para la construcción de la vivienda, los más comunes en la de interés social son: block hueco, ladrillo y tabique para muros, y, losa de concreto y aligerada para techos⁴¹.

⁴⁰ Morillón D. et al., (2017), Materiales y sistemas constructivos usados en la vivienda, México.

⁴¹ Andrade A. y Morillón D., (2007), Diagnóstico del comportamiento térmico, energético y ambiental de la vivienda de interés social en México: una retrospectiva y prospectiva (2001-2012), Tesis de maestría, UNAM, México, Págs. 17-18.

Tomando como referencia los materiales más utilizados en muros y techos para la construcción de viviendas de interés social⁴², se proponen los materiales y sistema constructivo para la vivienda de interés social proyectada en este caso de estudio (Tabla 4.17):

Tabla 4.17 Características físicas y térmicas del sistema constructivo propuesto para la vivienda de interés social del caso de estudio (Texcoco)

Elemento	Materiales de construcción	Espesor (m)	Densidad (kg/m ³)	Conductividad térmica (W/m°C)	U Total Calculada W/m ² °C
Muro	Bloque de concreto de 2 o 3 huecos	0.2	1700	0.998	0.3265
	Aire	0.16	1.2	0.026	
	Mortero cemento arena	0.02	2000	0.63	
	Aplanado de yeso	0.015	800	0.372	
	Aislamiento térmico certificado *	0.010	-----	0.040	
Techo	Losa de concreto ligero	0.14	1250	0.582	1.3170
	Aislamiento térmico certificado *	0.010	-----	0.040	
	Aplanado de yeso	0.015	800	0.372	
Puertas	Madera	0.050	505	0.130	1.7094
Ventanas	Vidrio monolítico de color gris	0.006	-----	0.045	3.0

Fuente: Morillón D. et al., (2017), Materiales y sistemas constructivos usados en la vivienda, México; Andrade A. y Morillón D., (2007), Diagnóstico del comportamiento térmico, energético y ambiental de la vivienda de interés social en México: una retrospectiva y prospectiva (2001-2012), Tesis de maestría, UNAM, México; NOM-020-ENER-2011; *NOM-018-ENER-1997

Las ventanas propuestas cuentan con filtros solares, con las siguientes características:

Tabla 4.18 Características de desempeño térmico de la ventana⁴³, propuesto para la vivienda de interés social del caso de estudio (Texcoco)

Producto	Esp. (mm)	Energía Solar				Coeficiente de sombreado %
		Trans. %	Ref. %	Abs. %	Trans. UV %	
Vidrio Monolítico de color gris	6	41	5	54	21	0.66

La superficie para las distintas porciones de elementos que componen la vivienda de interés social tipo económica, considerando que la vivienda no cuenta con ventanas en las fachadas este y oeste, se mencionan a continuación:

⁴² Ibídem.

⁴³ Información técnica, Extralum vidrio y aluminio comercial.

Tabla 4.19 Superficies de los diferentes espacios que integran la vivienda de interés social tipo económica de 59m²

Elemento	Área (m ²)
Muro norte	14.73
Puerta norte	1.68
Ventana norte	3.3
Muro este	25.3
Muro sur	13.51
Puerta sur	1.68
Ventana sur	2.08
Muro oeste	25.3
Techo	59.12

ii. Ganancia de calor por la envolvente

La siguiente etapa de este apartado es evaluar el comportamiento térmico del edificio proyectado con las características de los materiales de construcción arriba mencionados, con la finalidad de medir su eficiencia energética en comparación con el edificio de referencia utilizando el método de Ganancia de calor en la envolvente (NOM-020-ENER-2011) que se describió en el capítulo anterior, donde se suman las ganancias térmicas por radiación (ϕ_{ps}) más las ganancias térmica por conducción (ϕ_{pc}) -se considera el fenómeno de la convección para el cálculo del comportamiento térmico de los materiales -, donde la ganancia total térmica de la envolvente del edificio:

$$\phi_p = \phi_{pc} + \phi_{ps}$$

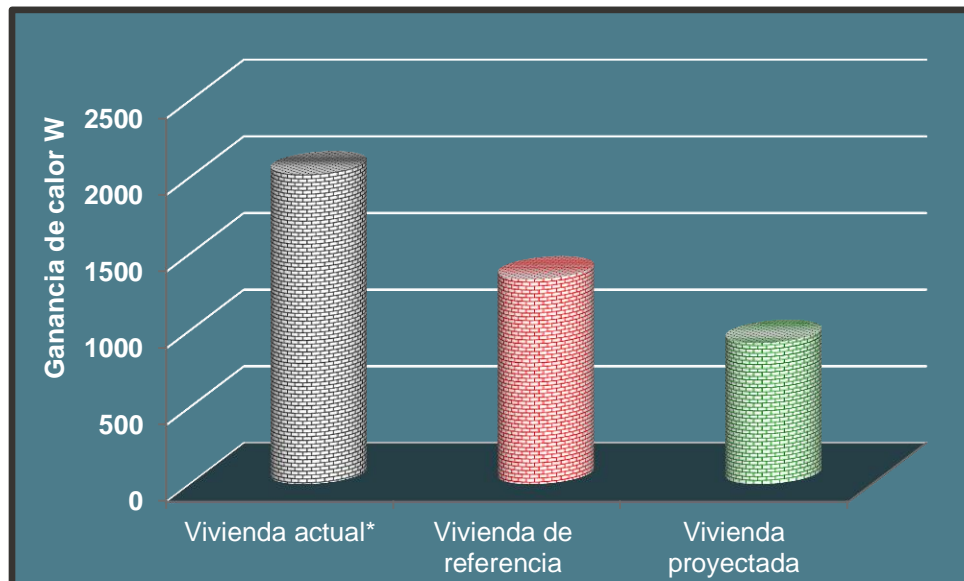
Los resultados de las ganancias y pérdidas térmicas de la vivienda de referencia y proyectada, se presentan a continuación:

Tabla 4.20 Comparación de ganancia total de la envolvente en la vivienda proyectada con la de referencia

	Ganancia por conducción y convección** (W)	Ganancia por radiación (W)	Total (W)
Vivienda de Referencia*	235.88	1099.14	1335.01
Vivienda Proyectada	647.82	271.79	919.61
Diferencia	-411.94	+827.35	+215.4

Fuente: Elaborada con herramienta para cálculo de la NOM-020-ENER-2011 V.3.4, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía; *Vivienda de referencia caracterizada según la NOM-020-ENER-2011; **El fenómeno de la convección se considera para el cálculo del comportamiento térmico de los materiales mediante el uso del coeficiente de convección exterior e interior

La ganancia de calor total de la vivienda proyectada es de 919.61 W, por lo tanto es 215.4 W más eficiente respecto a la vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011, la disminución de las ganancias por radiación en la vivienda proyectada fue de 827.35 W debido a la consideración de aleros de protección y de ventanas con filtros solares para evitar las ganancias térmicas en temporadas de calor y las pérdidas de calor concentradas en el edificio en temporadas de frío.



Gráfica 4.3 Comparación de la ganancia de calor total en la vivienda proyectada con materiales y sistema constructivo propuestos para conservar o provocar confort contra vivienda de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011 y la vivienda actual*

Fuente: Elaborada con datos obtenidos de la Tabla 4.20; *Considerando los materiales más utilizados a nivel nacional para muros: tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto, y, para techos: losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería, en bioclima templado. Morillón D., (2012), Evaluación de las tecnologías, Grupo de Tecnologías Sustentables - Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

4.1.3.1.1.3 Beneficios energéticos por el uso del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

Posterior a la evaluación térmica, se calcula el impacto energético anual que se tiene al dejar de utilizar los sistemas de aire acondicionado por la reducción de la carga de calor al interior de la vivienda (Andrade y Morillón, 2007), a continuación se presentan los resultados:

Tabla 4.21 Ahorro de energía eléctrica anual mostrado en la vivienda proyectada respecto a la de referencia*, por la disminución del uso de aire acondicionado, para Texcoco

Diferencia entre la vivienda proyectada (+) y la vivienda de referencia (kWh eléctricos)	Total de horas de calor anual (se requiere aire acondicionado)	Consumo de kWh/año de eléctricos evitados en la vivienda proyectada
0.069	183	12.61

Fuente: Elaboración propia con datos de la evaluación térmica y del diagrama de isorrequerimientos; *Vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011

En este bioclima al considerar una selección de materiales y sistema constructivo adecuados, así como al aplicar medidas de control solar con el uso de aleros y ventanas con filtros solares, no se observa un beneficio energético importante mostrando en la vivienda proyectada respecto a la vivienda de referencia un ahorro de 12.61 kWh/año, sin embargo, favorece a provocar o conservar la sensación de confort. En bioclimas extremos los materiales de construcción y medidas de control solar pueden ser un factor determinante en el consumo energético utilizando recursos naturales no renovables para cubrir las necesidades de aire acondicionado o calefacción.

Dependiendo de las características específicas del bioclima, se deben seleccionar los materiales de construcción disponibles en el sitio, en el trabajo de Materiales y sistemas constructivos usados en techos y muros de la vivienda en México (Morillón et al., 2011), NOM-020-ENER-2011, entre otros, se proporciona una lista amplia que comprende los materiales de construcción y sistemas constructivos más utilizados en México con sus respectivas características térmicas.

4.1.3.1.2 Iluminación natural

A continuación se describe inicialmente la evaluación del potencial de la iluminación natural mediante el conocimiento de la iluminancia exterior en superficies horizontales y verticales en su componente global y difusa, posteriormente se presenta una metodología para aprovechar la iluminación natural de forma directa e indirecta en los edificios concluyendo esta etapa mostrando algunas de los beneficios energéticos obtenidos al utilizar la iluminación natural en los edificios.

4.1.3.1.2.1 Evaluación del potencial de la iluminación natural

Se realiza una estimación de los niveles de iluminancia global y difusa horaria en superficies verticales y horizontales utilizando Biosol, para este trabajo se considera la estimación de la iluminancia exterior mostrando el abundante recurso solar aprovechable con iluminación natural aunado a un correcto diseño lumínico se puede reducir el uso de la iluminación artificial de manera total o parcial en horas diurnas.

Se requieren datos de entrada para realizar la estimación de iluminancia global y difusa en Biosol, son tomados los valores horarios calculados anteriormente de temperatura, humedad relativa y radiación. En la Tabla 4.22 y Tabla 4.23 es presentada la iluminancia global horizontal horaria y la iluminancia difusa horizontal horaria, respectivamente, para Texcoco, México.

Los valores máximos de iluminancia difusa horizontal (Tabla 4.23) se tienen en los meses de abril a septiembre, esto debido a que en esos meses se presentan la temporada de lluvias en Texcoco, provocándose por el factor lluvia una mayor nubosidad.

Los valores máximos estimados de la iluminancia global horizontal (Tabla 4.22) se muestran en los meses de abril, mayo, junio, julio y agosto, debido a la alta cantidad de irradiación que se presenta es esos meses.

Tabla 4.22 Iluminancia global horaria en superficies horizontales (klux), Texcoco, México

ESTIMACIÓN DE ILUMINANCIA HORARIA MEDIA MENSUAL SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES												
Localidad	Texcoco, Estado de Méxi		Latitud		19.511258		Longitud		-98.990669		Altitud [m]	2250
Hora/Mes	Iluminancia Global Horizontal [klux]											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
01:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
02:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
03:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
04:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
05:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
06:00	0.000	0.000	0.000	3.628	6.185	7.126	6.230	3.342	0.000	0.000	0.000	0.000
07:00	7.164	10.911	15.900	19.859	22.079	21.840	21.115	18.170	15.012	10.467	6.977	5.631
08:00	25.182	30.179	35.481	39.003	40.313	38.848	38.441	35.355	33.409	28.005	24.659	22.719
09:00	42.453	50.283	56.069	58.757	58.870	56.055	56.053	53.199	52.728	46.799	43.638	41.209
10:00	59.061	65.238	71.064	76.019	74.940	70.906	71.303	68.787	69.805	63.616	60.802	55.481
11:00	70.599	77.081	82.975	84.105	82.235	80.971	81.662	79.427	81.544	75.252	72.748	66.657
12:00	74.695	81.268	87.170	88.049	85.888	84.524	85.324	83.195	85.712	79.391	73.871	70.627
13:00	70.536	77.006	82.894	84.035	82.186	80.949	81.642	79.402	81.513	75.213	72.704	66.594
14:00	59.024	65.184	70.996	75.971	74.901	70.880	71.280	68.759	69.776	63.585	60.774	55.446
15:00	42.499	50.312	56.091	58.767	58.871	56.053	56.051	53.200	52.735	46.816	43.667	41.244
16:00	25.240	30.248	35.557	39.073	40.368	38.883	38.472	35.391	33.451	28.056	24.715	22.777
17:00	7.200	10.969	15.959	19.929	22.145	21.889	21.156	18.193	15.049	10.498	7.012	5.662
18:00	0.000	0.000	0.000	3.651	6.221	7.149	6.247	3.356	0.000	0.000	0.000	0.000
19:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaborada con Biosol

Tabla 4.23 Iluminancia difusa horaria en superficies horizontales (klux), Texcoco, México

ESTIMACIÓN DE ILUMINANCIA HORARIA MEDIA MENSUAL SOBRE SUPERFICIES HORIZONTALES												
Localidad	Texcoco, Estado de Méxi		Latitud		19.511258		Longitud		-98.990669		Altitud [m]	2250
Hora/Mes	Iluminancia Difusa Horizontal [klux]											
	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
01:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
02:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
03:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
04:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
05:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
06:00	0.000	0.000	0.000	3.157	5.109	5.479	4.861	3.216	0.000	0.000	0.000	0.000
07:00	4.815	7.419	9.665	12.609	13.718	14.182	13.825	11.532	11.064	7.841	5.529	4.097
08:00	12.292	15.203	18.183	21.166	21.639	21.872	21.721	21.378	20.735	17.450	14.333	11.934
09:00	19.573	21.989	25.122	28.121	28.066	28.092	28.094	28.322	28.552	25.270	21.870	18.642
10:00	24.181	27.494	30.426	33.118	32.670	32.553	32.667	33.306	34.181	30.948	27.397	24.339
11:00	26.876	30.222	33.099	35.645	34.892	35.180	35.366	36.241	37.504	34.312	30.696	27.177
12:00	27.731	31.076	33.925	36.445	35.638	36.024	36.236	37.180	38.564	35.377	32.117	28.078
13:00	26.825	30.157	33.026	35.577	34.843	35.131	35.321	36.181	37.431	34.222	30.602	27.122
14:00	24.149	27.445	30.362	33.010	32.583	32.492	32.612	33.239	34.109	30.873	27.334	24.307
15:00	19.615	22.052	25.172	28.146	28.070	28.087	28.089	28.325	28.570	25.315	21.941	18.718
16:00	12.423	15.366	18.368	21.349	21.780	21.967	21.804	21.482	20.857	17.597	14.486	12.074
17:00	4.858	7.490	9.827	12.812	13.906	14.327	13.949	11.655	11.184	7.947	5.580	4.136
18:00	0.000	0.000	0.000	3.191	5.162	5.554	4.919	3.240	0.000	0.000	0.000	0.000
19:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
21:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
22:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
23:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
00:00	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

Fuente: Elaborada con Biosol

También es posible obtener la iluminancia global y difusa en superficies inclinadas. Biosol toma los valores de los ángulos de orientación e inclinación seleccionados para la estimación de la irradiación en superficies inclinadas.

Para el cálculo de la iluminación natural en interiores se requiere conocer la disponibilidad de la luz natural exterior en las cuatro paredes que rodean a un edificio. Por tal motivo se estima la iluminancia exterior en las cuatro fachadas principales (norte, sur, este y oeste). En las tablas 4.24 y 4.25 se muestra la estimación de la iluminancia global promedio en superficie horizontal y en las cuatro fachadas verticales principales.

En la tabla 4.24 se puede observar que, en los meses de diciembre y enero, la iluminancia promedio mayor se presenta en la fachada sur debido a la baja altura solar en esa orientación para esos meses, para el resto de los meses esos valores de iluminancia promedio mayor transcurren en superficie horizontal.

Aunque la altura máxima solar que alcanza el Sol en esa latitud es en junio, la máxima iluminancia horizontal promedio ocurre en los meses de abril y mayo, debido a la alta cantidad de irradiación solar que incide en esos meses. Así como se observa un comportamiento prácticamente simétrico en las fachadas este y oeste.

Tabla 4.24 Iluminancia global promedio mensual (klux) en superficies horizontales y verticales, para Texcoco

Mes/Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Ene	37.66	6.45	19.61	19.61	37.20
Feb	31.52	6.84	21.02	21.02	42.21
Mar	22.45	6.98	22.29	22.27	46.93
Abr	11.88	8.63	23.32	23.29	50.07
May	7.40	13.30	22.95	22.93	50.40
Jun	7.74	16.79	22.39	22.36	48.93
Jul	7.64	13.66	22.51	22.48	48.84
Ago	11.50	8.58	21.37	21.34	46.14
Sep	21.98	7.90	21.38	21.36	45.44
Oct	30.44	7.56	20.09	20.06	40.59
Nov	37.28	7.04	19.24	19.23	37.81
Dic	38.84	6.41	18.66	18.65	34.93

Fuente: Elaborada con información generada en Biosol

En la tabla 4.25 presenta la siguiente información, la iluminancia difusa promedio mayor se presenta en el mes de junio sobre el plano horizontal, coincidiendo con la máxima altura solar correspondiente a esa latitud. Por otro lado, la iluminancia difusa promedio menor se presenta en el mes de diciembre sobre la fachada norte.

Tabla 4.25 Iluminancia difusa promedio mensual (klux) en superficies verticales y horizontales, para Texcoco

Mes /	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Ene	16.10	6.45	10.39	10.41	15.64
Feb	15.28	6.84	11.49	11.51	18.15
Mar	12.82	6.98	12.37	12.39	20.55
Abr	9.35	7.92	13.74	13.77	23.41
May	7.40	9.82	13.71	13.74	23.70
Jun	7.74	11.61	13.94	13.96	23.92
Jul	7.64	10.20	13.93	13.95	23.81
Ago	9.38	8.05	13.68	13.69	23.48
Sep	14.02	7.90	13.75	13.77	23.29
Oct	16.72	7.56	12.60	12.62	20.55
Nov	17.47	7.04	11.25	11.27	17.84
Dic	16.63	6.41	10.14	10.16	15.43

La iluminancia global y difusa promedio en superficies horizontales es mayor a cualquiera de las demás superficies verticales (fachada norte, sur, este y oeste).

Además se debe considerar una serie de factores determinados en un edificio que se quiere iluminar con luz natural, como superficies vidriadas, las condiciones del cielo, etc., como ya observamos la luz natural exterior que llega a una superficie horizontal e inclinada en Texcoco en sus componentes global y difusa, puede ayudar a cubrir parcial o totalmente cualquier actividad visual a desarrollar en un edificio por los usuario sin presentar complicaciones (confort lumínico). El aprovechamiento de la iluminación natural, puede cubrir las necesidades de iluminación en horas diurnas de hasta el 100% del tiempo.

4.1.3.1.2.2 Aprovechamiento de la iluminación natural

i. Estudio del bioclima

ii. Aprovechamiento de la iluminación natural directa e indirecta

- ◆ Se estableció un horario entre las 6 horas y las 18 horas (según datos del DDI y de la iluminancia exterior horaria), intervalo que puede variar según la latitud.
- ◆ Se determinaron las horas en las que se presentan sensaciones de calor y confort en el DDI, y sobreponer los valores de iluminancia difusa horaria de la fachada norte en esas horas en el DDI (Figura 4.11), seleccionando la iluminancia difusa de la fachada norte debido a que cuenta con los valores

más bajos en comparación del resto de los valores de iluminancia difusa incidente en superficies verticales y horizontales mostrando que puede realizarse cualquier actividad visual inclusive con la iluminancia difusa que presenta los menores índices de iluminancia, en este intervalo de tiempo se propone utilizar la iluminación natural indirecta (iluminancia difusa) evitando así la radiación.

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00												
07:00												
08:00												
09:00				10.15	12.74	14.22						
10:00		10.01	9.90	10.08	11.49	13.29	11.64	10.11	10.98	10.92		
11:00	9.82	9.69	8.95	7.98	8.34	11.58	9.58	9.03	10.42	10.94	10.82	10.24
12:00	9.76	9.43	8.33	6.57	5.68	10.16	7.55	7.98	9.96	10.81	10.92	10.24
13:00	9.80	9.67	8.93	7.97	8.33	11.56	9.57	9.02	10.40	10.91	10.78	10.22
14:00	9.69	10.00	9.88	10.05	11.46	13.26	11.62	10.09	10.96	10.89	10.40	9.98
15:00	8.87	8.96	9.61	10.16	12.74	14.21	12.87	10.20	10.66	10.07	9.23	8.15
16:00	5.92	7.03	8.02	9.46	12.52	13.73	12.62	9.56	8.93	7.90	6.77	5.80
17:00	2.82	4.17	4.85	7.61	10.21	11.24	10.30	6.44	5.43	4.01	3.17	2.42
18:00	0.00	0.00	0.00	3.04	5.84	6.50	5.62	3.10	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 4.11 Valores de iluminancia difusa horaria de la fachada norte (klux), sobrepuestos en el DDI cuando se presentan sensaciones de calor y confort, para Texcoco

- ◆ Se determinan las horas en las que se presenta sensación de frío en el DDI, y sobreponer los valores de iluminancia global horaria de la fachada norte en esas horas en el DDI (Figura 4.12), seleccionando la iluminancia global de la fachada norte debido a que cuenta con los valores más bajos en comparación del resto de los valores de iluminancia global incidente en superficies verticales y horizontales mostrando que puede realizarse cualquier actividad visual inclusive con la iluminancia global que presenta los menores índices de iluminancia, en este intervalo de tiempo se propone iluminación natural directa (iluminancia global) provocando ganancias de calor que se pueden deducir en confort en la temporada de invierno, una forma de climatizar pasivamente.

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00	0.00	0.00	0.00	4.34	8.82	11.06	9.42	3.43	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	2.79	4.13	4.77	9.96	15.98	17.48	15.44	8.70	5.37	3.95	3.14	2.39
08:00	5.86	6.95	7.94	10.24	18.05	20.33	17.74	10.26	8.88	7.83	6.70	5.74
09:00	8.85	8.93	9.59				16.94	10.20	10.66	10.05	9.20	8.12
10:00	9.71										10.43	9.99
11:00												
12:00												
13:00												
14:00												
15:00												
16:00												
17:00												
18:00												

Figura 4.12 Valores de iluminancia global horaria de la fachada norte (klux), sobrepuestos en el DDI cuando se presenta la sensación de frío, para Texcoco

- ◆ Posteriormente se cuantificaron las horas –recuadros- de iluminancia difusa y global sobrepuestos en el DDI para condiciones de frío, calor y confort (Figura 4.11 y 4.12), que cuentan con un valor de 0 klux, para nuestro caso es de 14 recuadros, equivalente al 8.97% de tiempo, por lo tanto el 91.3% restante del tiempo de horas diurnas a lo largo del año se puede suministrar iluminación natural directa o indirecta en sus componentes difusa o global en superficies horizontales y verticales, evitando las ganancias de calor en condiciones de calor y confort, así como captando iluminación directa en periodos de frío cuidando el deslumbramiento -156 recuadros representan 100% tiempo-.

La tabla 4.26 muestra los niveles mínimos de iluminación (lux) requeridos en los centros de trabajo en México, comparando esos requerimientos de iluminación con los valores mínimos de iluminancia exterior global y difusa horaria en superficies verticales y horizontales, que se encuentran en los 2390 y 2420 luxes , cantidad de luxes suficientes para satisfacer la tarea visual más compleja en los centros de trabajo de México, iluminación natural de la que se dispone 91.3% del tiempo con horas diurnas para Texcoco.

Tabla 4.26 Niveles de iluminación (lux) requeridos en distintas áreas de trabajo en México comparados con los mínimos valores horarios de iluminancia global y difusa para Texcoco, marcando con “✓” si cumple o con “X” si no cumple

Tarea visual del puesto de trabajo	Niveles mínimos de iluminación (lux)	Mínimo valor de iluminancia difusa horaria en fachada norte : 2420 luxes	Mínimo valor de iluminancia global horaria en fachada norte : 2390 luxes
En exteriores: distinguir el área de tránsito	20		
En interiores, distinguir el área de tránsito	50		
En interiores	100		
Requerimiento visual simple	200		
Distinción moderada de detalles	300		
Distinción clara de detalles	500		
Distinción fina de detalles	750		
Alta exactitud en la distinción de detalles	1000		
Alto grado de especialización en la distinción de detalles	2000		

Fuente: Condiciones de iluminación en los centros de trabajo, Nom-025-STPS-2008 en comparación con los valores horarios mínimos de iluminancia global y difusa en Texcoco

4.1.3.1.2.3 Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural en los edificios

Para cuantificar algunos de los beneficios de la iluminación natural que se pueden lograr en los edificios se sugiere seguir la siguiente guía:

- ◆ Debido a que se desconoce el horario promedio mensual en que es utilizada la iluminación artificial dentro del edificio de estudio cuando se dispone de iluminación natural –horas diurnas-, se propone considerar un horario de entre 6:00-9:00 horas (horario en el que puede requerirse la iluminación para realizar diversas actividades del usuario por comienzo de actividades laborales, escolares, domésticas, etc.)
- ◆ Se consideran las iluminancias horarias según el tipo de iluminación natural que se requiera (directa o indirecta), entre 6:00-9:00 horas mostrado en la Tabla 4.27.

Tabla 4.27 Valores de iluminancia difusa (color blanco) y global (color azul) horaria en fachada norte (klux) sobrepuestos en el DDI según los requerimientos de iluminación natural, con horario de 6:00-9:00 horas, para Texcoco

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00	0.00	0.00	0.00	4.34	8.82	11.06	9.42	3.43	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	2.79	4.13	4.77	9.96	15.98	17.48	15.44	8.70	5.37	3.95	3.14	2.39
08:00	5.86	6.95	7.94	10.24	18.05	20.33	17.74	10.26	8.88	7.83	6.70	5.74
09:00	8.85	8.93	9.59	10.15	12.74	14.22	16.94	10.20	10.66	10.05	9.20	8.12

- ◆ Se contabilizan los recuadros –horas- que hay niveles de iluminancia con un valor >0 (klux) entre las 6:00-9:00 horas, ese calculo se realiza por mes, el número de horas que salga en cada mes se multiplica por el número de días del mes y al final se suman las horas resultantes de cada mes, por ejemplo en enero se cuenta con 3 horas con iluminación y se multiplica por el número de días del mes que es 31 con un resultado de 93 horas, se realiza el mismo procedimiento para el resto de meses.
- ◆ El número de horas total que se tiene iluminancia con valores >0 (klux), en este caso de estudio es de 1251 horas, se multiplican por 23 W de potencia de una lámpara fluorescente compacta (LFC) equivalente a un foco incandescente de 100 W de potencia, se considera el ahorro con iluminación natural de una LFC de 23 W en este caso de estudio para no sobreestimar los ahorros, aunque lo recomendable es conocer el número de focos o LFC que se evitarían utilizar al aprovechar la iluminación natural, que de acuerdo con datos del INEGI (2015), 40.6% de las viviendas en México cuenta con una cifra de 6 a 10 focos.
- ◆ La cantidad resultante en W se convierte a kWh obteniendo el siguiente resultado: 28.773 kWh/añual de ahorro utilizando la iluminación natural, el resultado de ahorro con iluminación natural de kWh/añual es un valor modesto por los datos de subestimación propuestos del tiempo que puede aprovecharse en

sustitución de la iluminación artificial además de que se considera el ahorro con una lámpara de consumo eficiente. Sin embargo, si se toma en cuenta el ahorro al dejar de utilizar focos incandescentes de 60 W por 1251 horas se tendría un ahorro de 75.06 kWh/año por vivienda.

4.1.3.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón

4.1.3.1.3.1 Utilización del calentador solar de agua por línea base

Con datos del potencial de irradiación solar de la región, se puede conocer que tan factible es aprovechar el calentamiento solar de agua en sustitución parcial o total de calentamiento de agua con gas, para ello es necesario conocer la línea base de consumo energético para calentamiento de agua basándose en el trabajo Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009):

Tabla 4.28 Línea base por consumo final de gas LP (kg/año), para la vivienda del D.F.

Concepto	Línea base (kg/año)
Calentador de gas convencional	388.8

Fuente: Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009)

Para dimensionar un colector solar de agua se requiere información como conocer el número de miembros por familia en una vivienda en promedio, para México ese dato corresponde a 3.9 personas (INEGI, 2010), adicionalmente se considera la siguiente información necesaria para el dimensionamiento y beneficios del uso de calentadores solares de agua para el sector doméstico (Ramos y Patiño, 2006):

Tiempos de uso por día

Regadera: 36 minutos

Para baño (ducha): 46 lt / agua caliente (ac) *día* persona

Con base en la información anterior, es posible conocer el consumo de agua caliente por día, en una casa promedio, utilizada para el baño:

Consumo de agua caliente por día = (3.9 personas*46lt /ac*día) = 179.4 lt /día

Posteriormente, para la selección del calentador solar de agua se calcula la cantidad de energía requerida en el agua caliente (Ec. 39).

$L = (179.4 \text{ lt/día}) (4.2 \text{ KJ/kg } ^\circ\text{C}) (55 \text{ } ^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 26,371.8 \text{ KJ / día}$

Una vez calculada la energía requerida en el agua caliente (se convierte a kWh), se determina el tamaño del colector solar plano de cobre (Ec. 40):

$$A = \frac{7.325 \text{ kWh} / \text{ día}}{(0.65)(5.833 \text{ kWh} / \text{ m}^2 * \text{ día})} = 1.94 \approx 2 \text{ m}^2$$

Con el dato del área del colector de 2 m² se cuantifica el potencial de ahorro diario de energía, se considera una eficiencia del colector solar plano de 65% y una eficiencia del 74% para el calentador de agua a gas –boiler convencional-, se utiliza la siguiente ecuación:

$$A_e = \frac{(2 \text{ m}^2)(5.102 \text{ kWh} / \text{ m}^2 / \text{ día})(65\%)}{74\%} = 8.9629 \text{ kWh} / \text{ m}^2 / \text{ día}$$

4.1.3.1.3.2 Utilización del calentador solar por tipo de clima

Otro parámetro a considerar es el clima de la región, medida adicional al criterio de la línea base de consumo final por gas, las características de cada clima permiten identificar las necesidades de calentamiento de agua con gas o si es calentamiento natural del agua al recibir de forma directa o indirecta irradiación solar, para ello se puede considerar la siguiente guía de referencia:

- ◆ Se establecieron como base las temperaturas medias mensuales para conocer la temperatura del agua de la red a lo largo del año.
- ◆ Se consideró que la temperatura del agua de la red pública con sensación confortable para bañarse sea $\geq 25^\circ\text{C}$.
- ◆ Se cuantificaron los recuadros con una temperatura $\geq 25^\circ\text{C}$ (Tabla 4.29), para nuestro caso de estudio es de 0 recuadros, que representa el 0% del tiempo establecido que es una porción de tiempo despreciable -12 recuadros equivalen 100% del tiempo-, debido a eso, la utilización de un calentador solar si podría representar ahorros energéticos importantes con el calentamiento de agua, se considera como requerido el calentamiento de agua con medios como el gas o colector solar de agua para el clima templado de nuestro caso de estudio (Tabla 4.30).

Tabla 4.29 Temperaturas medias mensuales y anuales en °C ($\geq 25^{\circ}\text{C}$), para Texcoco

Elementos	En	Febr	Mzo	Abr	My	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura media mensual	12.5	13.7	15.7	17.6	18	17.7	16.6	16.7	16.3	15.5	13.9	12.8	15.6

Fuente: Normales climatológicas

Tabla 4.30 Requerimiento de calentamiento de agua utilizando gas o colector solar según la temperatura horaria del lugar de estudio

% Recuadros con temperaturas máxima y media mensual y anual $\geq 28^{\circ}\text{C}$	Requerimiento de calentamiento de agua con gas o colector solar
< 25 %	Requerido
≥ 25 %	Moderadamente Requerido
≥ 50 %	Poco Requerido

Fuente: Elaboración propia

4.1.3.1.3.3 Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua

El ahorro anual de energía obtenido en el apartado de utilización del calentador solar de agua por línea base (8.9629 kWh*día), lo multiplicamos por el número de días del año, con un resultado de 3, 271.49 kWh equivalentes a 11.77 millones de kJ/año, si consideramos que el poder calorífico del GLP es de 26,727 kJ/lit GLP, al utilizar un CSA se dejarán de consumir 440.65 lit. GLP/año equivalente a 237.95 kg GLP considerando un factor de conversión de 1 lit. GLP igual a 0.54kg GLP.

La línea base de consumo final por gas para el área Metropolitana de la Ciudad de México se estable en 388.8 kg/año (Morillón, 2009), por tanto, con el colector solar plano propuesto para este trabajo de 2 m² y un termotanque de almacenamiento de 150-180lt, es posible cubrir gran parte de energía requerida para calentamiento de agua mediante el CSA ahorrando 237.95 kg GLP/año, reduciendo 61.21% de consumo final por gas, dejando 150.85 kg/año para cubrir con gas equivalentes a 1843.72 kWh/año

Adicionalmente para nuestro caso de estudio se orienta el colector solar plano hacia el sur por estar en latitud Norte con una inclinación de 19° 30' correspondiente a su latitud para obtener un rendimiento mayor anual, el colector deberá cubrir algunas normas como lo es la NMX-ES-001-NORMEX-2005 y la NMX-ES-004-NORMEX-2010 para asegurar un correcto funcionamiento y durabilidad del sistema.

4.1.3.2 Sistemas Activos

4.1.3.2.1 Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos)

4.1.3.2.1.1 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Con el conocimiento del potencial del recurso solar existente en el lugar del caso de estudio y de las necesidades por cubrir con energía eléctrica proporcionados de una línea base de consumo de energía eléctrica en la vivienda para el área Metropolitana de la Ciudad de México (Tabla 4.31), se utiliza el método para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (Sánchez, 2015), se aplica para el caso de estudio, a continuación:

i. Información geográfica.

ii. Información energética. Para conocer el consumo de energía eléctrica diaria es tomada la línea base del consumo eléctrico anual (Morillón, 2009), dividiendo ese consumo de energía entre 365 (número de días en un año) y convirtiendo de kW a W (Tabla 4.31).

Tabla 4.31 Consumo final de energía eléctrica considerando una línea base, para el área Metropolitana de la Ciudad de México

Consumo de energía eléctrica	
Consumo anual de energía eléctrica (año)	1200 kWh/año
Consumo de energía diaria (día)	3287.67 Wh/día

Fuente: Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009)

iii. Consumo eléctrico total diario. Es obtenido dividiendo el consumo de energía eléctrica diaria (Wh/día) entre la eficiencia del inversor, considerándola en un 90%, más un factor de seguridad del 10%.

$$\text{Consumo eléctrico total diario} = \frac{3287.67 \text{ Wh/día}}{0.90} * 1.10 = 4018.26 \text{ Wh/día}$$

iv. Calculo del mes menos favorable. Este mes es calculado al dividir la irradiación global mensual entre el consumo de energía eléctrica total diaria, para este caso diciembre es el mes menos favorable (Tabla 4.32):

Tabla 4.32 Calculo del mes menos favorable, para Texcoco México

Mes / Concepto	Irradiación global [Rg] (kW/m ² día)	Consumo eléct. Total [Cet] (Wh/día)	Rg / Cet
Ene	4.42	4018.26	910.03
Feb	4.96	4018.26	810.10
Mar	5.49	4018.26	732.01
Abr	5.79	4018.26	694.00
May	5.80	4018.26	692.80
Jun	5.53	4018.26	726.63
Jul	5.53	4018.26	726.63
Ago	5.24	4018.26	766.84
Sep	5.21	4018.26	771.26
Oct	4.68	4018.26	858.60
Nov	4.41	4018.26	911.17
Dic	4.13	4018.26	972.94

v. **Elección de tipo de panel fotovoltaico.** En este trabajo se selecciona un módulo fotovoltaico de silicio cristalino, cuenta con 36 celdas conectadas en serie con diodos de bloque entregado, a continuación se mencionan sus características:

- P mod: 210 W
- V max: 18.30 V
- I max: 11.50 A
- Icc: 12.10 A
- Vca: 22.80 V

vi. **Calculo de número de módulos y tipo de arreglo.** El número de módulos a utilizar se obtiene al dividir el cociente del mes menos favorable (674.35) entre la potencia total del panel seleccionado (210W):

$$\text{No. de módulos} = \frac{972.94}{210} = 4.63 \approx 5 \text{ Módulos}$$

La cantidad de módulos en serie se obtiene dividiendo el voltaje del módulo, entre el voltaje del sistema (24V):

$$\text{No. módulos en serie} = \frac{24V}{24V} = 1 \text{ módulo en serie}$$

La cantidad de módulos en paralelo se obtiene dividiendo el número total de módulos entre el número de módulos en serie:

$$\text{No. módulos en paralelo} = \frac{5M}{1M} = 5 \text{ módulos en paralelo}$$

vii. Cálculo de parámetros del sistema fotovoltaico. En esta etapa se calcula la potencia total, voltaje máximo y corriente máxima, mediante las ecuaciones 46 a la 51 (Ver apartado 3.1.3.2.1):

$$\text{Potencia total} = 5 \text{ Mod} * 210W = 1050 W$$

$$\text{Voltaje máximo} = 18.30V * 1\text{Mod Serie} = 18.30 V$$

$$\text{Corriente máxima} = 11.50A * 5\text{Mod Paralelo} = 57.50 A$$

$$\text{Corriente total de corto circuito} = 12.10A * 5 \text{ Mod Paralelo} = 60.5 A$$

$$\text{Voltaje total de circuito abierto} = \frac{22.80V}{1\text{Mod.Serie}} = 22.80V$$

$$\text{Voltaje generación} = \frac{24V}{1\text{Mod.Serie}} = 24V$$

4.1.3.2.1.2 Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos

Para cuantificar los beneficios energéticos por el uso de sistemas fotovoltaicos en los edificios se multiplica la irradiación global diaria por la potencia total del sistema FV (0.840kW) por la eficiencia del inversor (90%), el resultado será la energía generada en un día para el mes analizado, por ejemplo para el mes de mayo (mes con mayor generación de energía/día),

$$\text{Energía generada / día} = 5.8 \text{ kW} / \text{m}^2 \text{ día} * 1.05 \text{ kW} * 0.90 = 5.481 \text{ kWh/día}$$

El resultado se multiplica por el número de días del mes:

$$\text{Energía generada / mes} = 5.481 \text{ kWh} / \text{día} * 31 \text{ días} = 169.911 \text{ kWh/mes}$$

Este mismo procedimiento se aplica para todos los meses, como resultado de la suma de la energía generada cada mes se obtiene la energía neta generada anualmente por el sistema fotovoltaico, para Texcoco se generan 1762.73 kWh/año (Tabla 4.33).

Adicionalmente para nuestro caso de estudio se orienta el sistema fotovoltaico hacia el sur por estar en latitud Norte con una inclinación de 19° 30' correspondiente a su latitud para obtener un rendimiento mayor anual, se deberán cubrir especificaciones de seguridad y funcionamiento de proyectos e instalaciones de sistemas fotovoltaicos como la ANCE-ESP-02 para asegurar un correcto funcionamiento y durabilidad del sistema.

Tabla 4.33 Cálculo de la energía eléctrica generada anualmente con el sistema fotovoltaico seleccionado, para Texcoco

Mes / Concepto	Irradiación global Rg(kW/m ² día)	Potencia total del sistema FV (kW)	Energía generada/día (kWh/día)	Energía generada/mes (kWh/mes)
Ene (31)	4.42	1.050	4.17	129.35
Feb (28)	4.96	1.050	4.69	131.25
Mar (31)	5.49	1.050	5.19	160.81
Abr (30)	5.79	1.050	5.47	164.15
May (31)	5.80	1.050	5.48	169.91
Jun (30)	5.53	1.050	5.23	156.78
Jul (31)	5.53	1.050	5.23	162.00
Ago (31)	5.24	1.050	4.95	153.51
Sep (30)	5.21	1.050	4.92	147.70
Oct (31)	4.68	1.050	4.42	137.10
Nov (31)	4.41	1.050	4.17	129.19
Dic (31)	4.13	1.050	3.90	120.99
				TOTAL = 1762.73 kWh/año

4.1.4 Balance de energía

El balance energético es la etapa final de este caso de estudio, donde se resta la cantidad de energía generada por el aprovechamiento integral de la energía solar al considerar diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, a la demanda de energía que se requiere en la vivienda, si se obtiene un balance con valores ≥ 0 significa que es una vivienda sustentable energéticamente y si es menor que 0 no lo es, aunque también se determina el nivel sustentable que se alcanza (Tabla 4.34):

Tabla 4.34 Nivel de sustentabilidad que se puede alcanzar en un edificio de acuerdo al resultado del balance de energía anual

Balance de energía kWh/año	Nivel de sustentabilidad
<0	No sustentable energéticamente
=0	Zet Zero Energy
>0	Plus Energy

A continuación se presenta el balance de energía anual para el caso de estudio en Texcoco de Mora, Estado de México (Tabla 4.35):

Tabla 4.35 Balance de energía, para el caso de estudio en Texcoco

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	-1200
Gas para el calentamiento de agua**	-1843.72
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	+1762.73
Energía por la envolvente del edificio (+/-)****	+0
Energía ahorrada con iluminación natural*****	+28.773
Balance de Energía	-1252.217

Fuente:*Considerando línea base de consumo eléctrico para el D.F. (Morillón, 2009); **Aplicando el uso de CSA quedando a cubrir 150.85 con gas kgGLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para el D.F. (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kgGLP/anual a kWh/anual = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ)/3.6-; ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Texcoco (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011, sin embargo, en este bioclima es nulo este ahorro porque la línea base de consumo de energía eléctrica no considera aire acondicionado; *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

Según el criterio de aceptación para considerar un edificio como sustentable energéticamente, al aprovechar integralmente la energía solar se cumple con un nivel de sustentabilidad tipo eficiente en una vivienda de interés social ubicada en Texcoco, Estado de México.

Con el objetivo de aumentar el nivel de sustentabilidad energética de una manera económica y viable, se propone sustituir la línea base de consumo energético por una línea de consumo energético eficiente basada en el trabajo: Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable (Morillón, 2007).

Tabla 4.36 Consumo energético final anual (kWh/año) considerando una línea de consumo energético eficiente, para el caso de estudio en Texcoco

	Línea base (kWh/año)	Ahorro anual* (kWh/año)	Consumo final de energía con uso de tecnología eficiente (kWh/año)
Iluminación	480.0	121.2	50.8
Refrigerador	348.0	247.08	517.98
Televisor	156.0	-----	156.0
Electrodomésticos	84.0	-----	84.0
Otros	132.0	-----	132.0
Total	1200	368.28	831.72
Boiler	4752	1381.11	3370.9

Fuente: Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable (Morillón, 2007); Líneas base para la vivienda sustentable en México (2009); *Sustituir focos incandescentes por LFC, sustituir refrigerador con antigüedad de 10 o más años, sustituir boiler convencional por boiler instantáneo termostático

Por la disminución en la demanda de gas para calentamiento de agua (boiler instantáneo termostático) y de la demanda de energía eléctrica al considerar tecnología eficiente (uso de LFC y refrigerador no mayor a 10 años de antigüedad), se reduce a 4 módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer dicha demanda, se realizan los ajustes necesarios y se vuelve a realizar el balance de energía:

Tabla 4.37 Balance de energía, para el caso de estudio en Texcoco

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	-831.72
Gas para el calentamiento de agua**	-462.61
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	+1410.18
Energía por la envolvente del edificio (+/-)****	+0
Energía ahorrada con iluminación natural*****	+28.773
Balance de Energía	+144.623

Fuente: *Considerando línea de consumo eléctrico eficiente para el D.F. (Morillón y Ceballos, 2012); **Aplicando el uso de CSA y de un boiler instantáneo termostático quedando a cubrir 37.85 kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para el D.F. (Morillón, 2009) – Factor de conversión de kg gas/anual a kWh/anual = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Texcoco (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011, sin embargo, en este bioclima es nulo este ahorro porque la línea eficiente de consumo de energía eléctrica no considera aire acondicionado; *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

Con la corrección en la demanda de energía al utilizar tecnología eficiente, se obtuvo un balance con energía excedente de 144.623 kWh/año de los que requiere la vivienda de interés social ubicada en Texcoco de Mora (bioclima templado), Estado de México, para funcionar en condiciones normales a lo largo del año, por lo cual es una vivienda con nivel de sustentabilidad tipo **Plus Energy**.

4.1.4.1 Beneficios ambientales

Para cuantificar los beneficios ambientales que se pueden lograr mediante el aprovechamiento de la energía solar, se presenta la Tabla 4.38:

Tabla 4.38 Mitigación de kg de CO₂/año al ambiente, para el caso de estudio en Texcoco

Consumo energético final	Energía abastecida con energía solar/año (kWh/año)	Factor de conversión de kWh a kg de CO ₂ según el tipo de consumo energético final**	Mitigación de kg de CO ₂ /año
Energía eléctrica	1200	0.385	462
Calentamiento de agua	2908.9*	0.234	680.68
			TOTAL: 1142.68

Fuente: *Aplicando el uso del CSA se ahorran 237.95 kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para el D.F. (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kg gas/año a kWh/año = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; **Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Aragón, España

Se considera la línea base de consumo energético (Morillón, 2009), para determinar la mitigación de kgCO₂/año con el aprovechamiento de la energía que abastece de manera total las necesidades por consumo de energía eléctrica y de manera parcial las necesidades por consumo de gas para calentamiento de agua.

4.2 Entorno con clima cálido seco: Ciudad Juárez, Chihuahua

A continuación se presenta la validación del método para una vivienda de interés social ubicada en Ciudad Juárez, Chihuahua, siguiendo el mismo procedimiento que en el caso de estudio con bioclima templado con ubicación en Texcoco, estado de México pero simplificando algunos pasos del mismo.

4.2.1 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares

Con información del entorno y mediante el diagnóstico que comprende el estudio del bioclima y de la radiación solar, se proponen estrategias y recomendaciones, aprovechando la energía solar en forma pasiva y activa.

4.2.1.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva

Como en el caso anterior se considera el aprovechamiento de la energía solar con sistemas pasivos mediante el uso de la iluminación natural, la climatización pasiva mediante el control solar y la selección adecuada de los materiales de construcción y el calentamiento solar de agua que conforman la envolvente del edificio.

4.2.1.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

4.2.1.1.1.1 Control Solar

Una de las estrategias para climatizar pasivamente es aprovechando o evitando la energía solar mediante el control solar conforme los datos horarios de sensación higrotérmica proporcionados por el diagrama de isorequerimientos. Se consideran los ángulos óptimos calculados en el trabajo de modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios (Mejía y Morillón, 2004) para Ciudad Juárez, Chihuahua:

Tabla 4.39 Ángulos óptimos para control solar en Ciudad Juárez, Chihuahua

Dispositivo / Orientación	Norte	Este	Sur	Oeste
Alero	70°	46°	60°	20°
Partesol	28°		28°	0°

Fuente: Método de modelo de diseño y evaluación solar (Mejía y Morillón, 2004)

4.2.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio

i. Definir las generalidades del edificio proyectado

Se utilizan las características de la vivienda seleccionada para el caso anterior que cuenta con 59 m² de superficie, ubicada de norte a sur, cuenta con una sala-comedor, una cocina, un baño y medio, dos recamaras, un patio de servicio y un cajón de estacionamiento, además de considerar el mismo sistema constructivo.

ii. Ganancia de calor por la envolvente

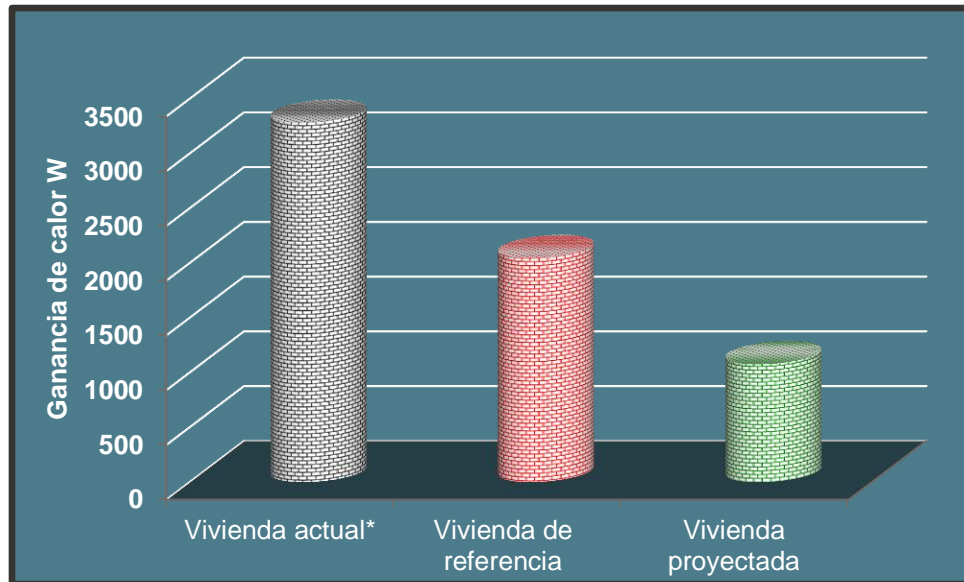
Los resultados de las ganancias de calor por conducción, convección y radiación de la vivienda de referencia y proyectada, se presentan a continuación:

Tabla 4.40 Comparación de ganancia total de la envolvente en la vivienda proyectada con la de referencia

	Ganancia por conducción y convección** (W)	Ganancia por radiación (W)	Total (W)
Vivienda de Referencia*	864.37	1181.4	2045.77
Vivienda Proyectada	827.05	248.53	1075.58
Diferencia	+37.33	+932.87	+970.19

Fuente: Elaborada en herramienta para cálculo de la NOM-020-ENER-2011, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía; *Vivienda de referencia caracterizada según la NOM-020-ENER-2011; **El fenómeno de la convección se considera para el cálculo del comportamiento térmico de los materiales mediante el uso del coeficiente de convección exterior e interior

La ganancia de calor total de la vivienda proyectada es de 1075.58 W, por lo tanto es 970.19 W más eficiente respecto a la vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011, la disminución de las ganancias por radiación en la vivienda proyectada fue 932.87 W debido a la consideración de aleros de protección y de ventanas con filtros solares para evitar las ganancias térmicas en temporadas de calor y las pérdidas de calor concentradas en el edificio en temporadas de frío.



Gráfica 4.4 Comparación de la ganancia de calor total en la vivienda proyectada con materiales propuestos para conservar o provocar confort contra vivienda de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011 y la vivienda actual

Fuente: Elaborada con datos obtenidos de la Tabla 4.40; *Considerando los materiales más utilizados a nivel nacional para muros: tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto, y, para techos: losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con viguería, en bioclima cálido seco. Morillón D., (2012), Evaluación de las tecnologías, Grupo de Tecnologías Sustentables - Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

4.2.1.1.1.3 Beneficios energéticos por el uso del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

Posterior a la evaluación térmica, se calcula el impacto energético anual que se tiene al dejar de utilizar los sistemas de aire acondicionado por la reducción de la carga de calor al interior de la vivienda (Andrade y Morillón, 2007), a continuación se presentan los resultados:

Tabla 4.41 Ahorro de energía eléctrica anual mostrado en la vivienda proyectada respecto a la de referencia*, por la disminución del uso de aire acondicionado, para Cd. Juárez

Diferencia entre la vivienda proyectada (+) y la vivienda de referencia (kWh eléctricos)	Total de horas de calor anual (se requiere aire acondicionado)	Consumo de kWh/añual eléctricos evitados en la vivienda proyectada
0.3105	1287	400

Fuente: Elaboración propia con datos de la evaluación térmica y del diagrama de isorrequerimientos; *Vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011

En este bioclima se observa un beneficio considerable que puede provocar una selección apropiada de los materiales de construcción incluyendo el uso de filtros solares en las ventanas así como de medidas de control solar con el uso de aleros, evitando al mismo tiempo el uso de equipos de aire acondicionado, mostrando en la vivienda proyectada respecto a la vivienda de referencia un ahorro de 400 kWh/anuales. Es un bioclima que gran parte del tiempo cuenta con sensación de frío, y el calor es la segunda sensación higrotérmica predominante por ello la importancia de tomar medidas como lo es el diseño bioclimático en las viviendas de bioclima cálido seco.

4.2.1.1.2 Iluminación natural

Se evalúa el potencial de la iluminación natural mediante el conocimiento de la iluminancia exterior en superficies horizontales y verticales en su componente global y difusa, posteriormente se propone como aprovechar la iluminación natural directa o indirecta en los edificios concluyendo con algunos de los beneficios energéticos que se tiene al utilizar la iluminación natural en los edificios.

4.2.1.1.2.1 Evaluación del potencial de la iluminación natural

Para el cálculo de la iluminación natural en interiores se requiere conocer la disponibilidad de la luz natural exterior en las cuatro paredes que rodean a un edificio, debido a ello se estima la iluminancia exterior en las cuatro fachadas principales (norte, sur, este y oeste). En las tablas 4.42 y 4.43 se muestra la estimación de la iluminancia global y difusa promedio en superficie horizontal y en las cuatro fachadas verticales principales.

La iluminancia global y difusa promedio en superficies horizontales es mayor a cualquiera de las demás superficies verticales (fachada norte, sur, este y oeste) al igual que en el caso anterior.

Tabla 4.42 Iluminancia global promedio mensual (klux) en superficies horizontales y verticales, para Ciudad Juárez

Mes /Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Ene	46.76	6.31	20.06	20.09	33.58
Feb	46.27	6.98	24.62	24.64	44.42
Mar	39.87	7.7	28.55	28.57	57.22
Abr	23.38	8.18	29.32	29.36	59.72
May	14.92	11.29	30.71	30.75	66.3
Jun	10.67	13.67	29.04	29.14	60.27
Jul	15.52	11.82	29.25	29.24	63.75
Ago	23.42	9.04	28.42	28.4	58.09
Sep	40.33	8.56	28.93	28.95	58.24
Oct	50.98	7.46	26.48	26.52	48.42
Nov	52.29	6.37	22.11	22.15	36.76
Dic	56.83	7.19	21.27	21.28	37.69

Fuente: Potencial estimado de la iluminación natural en México (Preciado y Morillón, 2011)

Tabla 4.43 Iluminancia difusa promedio mensual (klux) en superficies verticales y horizontales, para Ciudad Juárez

Mes /Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Ene	16.64	6.31	9.59	9.6	14
Feb	17	6.98	11.31	11.33	16.47
Mar	16.37	7.7	13.05	13.07	20.05
Abr	11.45	7.14	12.42	12.44	19.39
May	9.06	7.85	12.7	12.72	20
Jun	7.6	7.56	11.69	11.73	19.07
Jul	10.83	9.23	15.05	15.1	25.76
Ago	13.34	8.26	14.5	14.55	23.76
Sep	18.19	8.56	14.49	14.52	22.86
Oct	18.1	7.46	11.88	11.89	17.7
Nov	16.82	6.37	9.64	9.65	14.17
Dic	19.43	7.19	10.6	10.62	15.62

Fuente: Potencial estimado de la iluminación natural en México (Preciado y Morillón, 2011)

4.2.1.1.2.2 Aprovechamiento de la iluminación natural

Como en el caso de estudio para clima templado es seleccionada la iluminancia difusa de la fachada norte debido a que cuenta con los valores más bajos en comparación del resto de los valores de iluminancia difusa incidente en superficies verticales y horizontales, en este intervalo de tiempo se propone utilizar la iluminación natural indirecta (iluminancia difusa) evitando así la radiación (Figura 4.13):

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00												
07:00												
08:00												
09:00												
10:00							9.27					
11:00					6.64	6.58	7.80	8.78	9.57			
12:00				7.12	5.86	5.58	6.77	8.18	9.33	9.45		
13:00				7.57	6.63	6.57	7.78	8.75	9.55	9.44		
14:00			8.93	8.34	7.80	8.05	9.24	9.74	9.87	9.24	8.54	
15:00			8.66	8.63	8.49	8.83	10.05	10.16	9.62	8.37	7.24	
16:00			7.32	7.91	9.10	10.60	10.72	9.02	8.16	6.31	4.75	
17:00			4.49	6.37	8.97	10.39	10.29	7.09	5.05	2.92		
18:00				3.61	6.31	7.67	7.52	4.23	0.00	0.00		

Figura 4.13 Valores de iluminancia difusa horaria de la fachada norte (klux), sobrepuestos en el DDI cuando se presentan sensaciones de calor y confort, para Cd. Juárez

Posteriormente es seleccionada la iluminancia global de la fachada norte debido a que cuenta con los valores más bajos en comparación del resto de los valores de iluminancia global incidente en superficies verticales y horizontales, en este intervalo de tiempo se propone iluminación natural directa (iluminancia global) provocando ganancias de calor que se pueden deducir en confort en la temporada de invierno, una forma de climatizar pasivamente (Figura 4.14):

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00	0.00	0.00	0.00	8.83	17.80	21.20	15.09	7.78	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	0.81	2.58	4.46	8.07	17.36	21.30	16.91	8.45	4.98	2.91	0.75	0.00
08:00	4.75	5.96	7.27	7.86	12.09	16.74	13.28	8.87	8.08	6.26	4.73	4.16
09:00	7.21	7.88	8.63	8.60	8.47	8.99	10.03	10.13	9.57	8.33	7.21	6.80
10:00	8.50	8.71	8.93	8.35	7.81	8.08		9.77	9.88	9.23	8.52	8.26
11:00	9.04	8.91	8.69	7.59						9.45	9.06	8.91
12:00	9.19	8.91	8.49								9.20	9.10
13:00	9.08	8.90	8.68								9.07	8.95
14:00	8.57	8.72										8.31
15:00	7.29	7.91										6.87
16:00	4.81	5.99										4.20
17:00	0.81	2.60									0.75	0.00
18:00	0.00	0.00	0.00								0.00	0.00

Figura 4.14 Valores de iluminancia global horaria de la fachada norte (klux), sobrepuestos en el DDI cuando se presenta la sensación de frío, para Cd. Juárez

Se cuantifican las horas –recuadros- de la iluminancia difusa y global sobrepuestos en el DDI para condiciones de frío, calor y confort (Figura 4.13 y 4.14), que cuentan con un valor de 0 klux, para nuestro caso es de 16 recuadros, equivalente al 10.25%, debido a ello, el 89.75% restante del tiempo de horas diurnas se puede suministrar iluminación natural directa o indirecta en sus componentes difusa o global en superficies horizontales y verticales, evitando las

ganancias de calor en condiciones de calor y confort, así como captando iluminación directa en periodos de frío cuidando el deslumbramiento -156 recuadros representan el 100% de tiempo-.

4.2.1.1.2.3 Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural en los edificios

Son considerados los mismos criterios del caso anterior para esta parte del método, cuantificando que las horas totales que se tiene iluminancia según el tipo de iluminación natural requerida con valores >0 (klux) entre las 6:00 y 9:00 horas, en este caso de estudio es de 1217 horas, se multiplican por 23 W, potencia de una LFC.

La cantidad resultante en W se convierte a kWh obteniendo el siguiente resultado: 27.991 kWh/añual de ahorro es un valor modesto por los datos de subestimación propuestos del tiempo que puede aprovecharse la iluminación natural en sustitución de la iluminación artificial además de que se considera el ahorro con una LFC. Sin embargo, si se toma en cuenta el ahorro al dejar de utilizar un foco incandescente de 60 W por 1217 horas se tendría un ahorro de 73.02 kWh/añual por vivienda.

4.2.1.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón

4.2.1.1.3.1 Utilización del calentador solar de agua por línea base

Conociendo los niveles de irradiación solar en la región, se determina la factibilidad de aprovechar el calentamiento solar de agua en sustitución parcial o total del uso final por calentamiento de agua, se requiere conocer la línea base de consumo para calentamiento de agua (Morillón, 2009):

Tabla 4.44 Línea base por consumo final de gas LP (kg/año), para la vivienda en Chih.

Concepto	Línea base (kg/año)
Calentador de gas convencional	388.8

Fuente: Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009)

Igual que en el caso anterior se determina el área del colector solar, para Ciudad Juárez es de 1.65 m² y se considera el uso de un boiler convencional con eficiencia del 74%.

4.2.1.1.3.2 Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima

Otro factor que se puede considerar es el clima de la región, las características de cada clima permiten identificar las necesidades de calentamiento de agua con gas o si es calentamiento natural del agua al recibir de forma directa o indirecta radiación solar, para ello se considera la guía a seguir aplicada en el caso anterior y se sintetiza a continuación:

- ◆ Se cuantifican los recuadros con una temperatura $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (Tabla 4.45), para Ciudad Juárez es de 3 recuadros -12 recuadros representan el 100% de tiempo- que representa el 25% del tiempo establecido, porción considerable de tiempo, debido a eso el uso de un calentador solar podría ser moderadamente requerido (Tabla 4.30), en algunas temporadas principalmente en invierno que es cuando se tienen las temperaturas medias mensuales más bajas del año.

Tabla 4.45 Temperaturas medias mensuales y anuales en $^{\circ}\text{C}$ ($\geq 25^{\circ}\text{C}$), para Ciudad Juárez

Elementos	En	Feb	Mzo	Abr	My	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura media mensual	6.7	9.8	13.7	17.9	22.4	26.8	27.5	26.4	23.7	18	11.7	7	17.6

Fuente: Normales climatológicas

4.2.1.1.3.3 Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua

Se toma como referencia la línea base de consumo final por gas para Chihuahua establecida en 388.8 kg/año (Morillón, 2009), por tanto, con el colector solar plano propuesto de 1.65 m² equivalente a un ahorro anual de gas de 224 kg/año, es posible cubrir gran parte de energía requerida para calentamiento de agua mediante el CSA, reduciendo 57.73% de consumo final por gas, dejando 164.8 kg/año para cubrir con gas equivalentes a 2014.22 kWh/año.

Adicionalmente para nuestro caso de estudio se orienta el colector solar plano hacia el sur por estar en latitud Norte con una inclinación de 31.73° correspondiente a su latitud para obtener un rendimiento mayor anual, el colector deberá cubrir algunas normas como lo es la NMX-ES-001-NORMEX-2005 y la NMX-ES-004-NORMEX-2010 para asegurar un correcto funcionamiento y durabilidad del sistema.

4.2.1.2 Sistemas Activos

4.2.1.2.1 Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos)

4.2.1.2.1.1 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Es utilizado el método para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (Sánchez, 2015), donde se sintetizan algunos pasos:

- i. **Información geográfica.**
- ii. **Información energética.** Para conocer el consumo de energía eléctrica diaria es tomada la línea base de consumo anual de energía (Morillón, 2009), dividiendo ese consumo entre 365 (número de días en un año) y convirtiendo de kW a W (Tabla 4.46).

Tabla 4.46 Consumo final de energía eléctrica, para Chihuahua

Consumo de energía eléctrica	
Consumo anual de energía eléctrica (año)	2290 kWh/año
Consumo de energía diaria (día)	6273.97 Wh/día

Fuente: Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009)

- iii. **Consumo eléctrico total diario.** Es obtenido dividiendo el consumo de energía eléctrica diaria (Wh/día) entre la eficiencia del inversor, considerándola en un 90%, más un factor de seguridad del 10%.

$$\text{Consumo eléctrico total diario} = \frac{6273.97 \text{ Wh/día}}{0.90} * 1.10 = 7668.18 \text{ Wh/día}$$

- iv. **Calculo del mes menos favorable.** Este mes es calculado al dividir la irradiación global mensual entre el consumo de energía eléctrica total diaria, para este caso diciembre es el mes menos favorable (Tabla 4.47):

Tabla 4.47 Calculo del mes menos favorable, para Ciudad Juárez

Mes / Concepto	Irradiación global Rg(kW/m ² día)	Consumo de energía eléct. total Ceet (Wh/día)	Rg / Ceet
Ene	3.49	7668.18	2194.91
Feb	4.54	7668.18	1687.21
Mar	5.79	7668.18	1323.29
Abr	7.08	7668.18	1082.85
May	7.85	7668.18	976.65
Jun	8.02	7668.18	956.33
Jul	7.28	7668.18	1053.15
Ago	6.68	7668.18	1147.31
Sep	5.80	7668.18	1321.62
Oct	4.95	7668.18	1550.60
Nov	3.84	7668.18	1998.84
Dic	3.22	7668.18	2383.14

v. **Elección de tipo de panel fotovoltaico.** Es seleccionado el mismo panel fotovoltaico del caso anterior.

vi. **Calculo de número de módulos y tipo de arreglo.** El número de módulos a utilizar se obtiene al dividir el cociente del mes menos favorable (1301.80) entre la potencia total del panel seleccionado (210W):

$$\text{No. de módulos} = \frac{2383.14}{210} = 12$$

vii. **Calculo de parámetros del sistema fotovoltaico.** En esta etapa se calcula la potencia total, voltaje máximo y corriente máxima:

$$\text{Potencia total} = 12 \text{ Mod} * 210\text{W} = 2520 \text{ W}$$

$$\text{Voltaje máximo} = \frac{18.30\text{V}}{1\text{Mod.Serie}} = 18.30 \text{ V}$$

$$\text{Corriente máxima} = 11.5\text{A} * 12 \text{ Mod Paralelo} = 138 \text{ A}$$

$$\text{Corriente total de corto circuito} = 12.10\text{A} * 12 \text{ Mod Paralelo} = 145.2 \text{ A}$$

$$\text{Voltaje total de circuito abierto} = \frac{22.80\text{V}}{1\text{Mod.Serie}} = 22.80\text{V}$$

$$\text{Voltaje generación} = \frac{24\text{V}}{1\text{Mod.Serie}} = 24\text{V}$$

4.2.1.2.1.2 Beneficios energéticos por el uso de sistemas fotovoltaicos

La energía neta generada anualmente para Cd. Juárez es de 4741.3 kWh/añual.

Tabla 4.48 Cálculo de la energía eléctrica generada anualmente con el sistema fotovoltaico seleccionado, para Cd. Juárez

Mes / Concepto	Irradiación global Rg(kWh/m ² día)	Potencia total del sistema FV (kW)	Energía generada/día (kWh/día)	Energía generada/mes (kWh/mes)
Ene (31)	3.49	2.520	7.92	245.63
Feb (28)	4.54	2.520	10.31	288.62
Mar (31)	5.79	2.520	13.14	407.42
Abr (30)	7.08	2.520	16.06	481.82
May (31)	7.85	2.520	17.81	552.02
Jun (30)	8.02	2.520	18.19	545.57
Jul (31)	7.28	2.520	16.51	511.92
Ago (31)	6.68	2.520	15.16	469.91
Sep (30)	5.80	2.520	13.16	394.78
Oct (31)	4.95	2.520	11.22	347.69
Nov (31)	3.84	2.520	8.70	269.72
Dic (31)	3.22	2.520	7.30	226.23
				TOTAL = 4741.3 kWh/añual

Adicionalmente para nuestro caso de estudio se orienta el sistema fotovoltaico hacia el sur por estar en latitud Norte con una inclinación de 31.73° correspondiente a su latitud para obtener un rendimiento mayor anual, se deberán cubrir especificaciones de seguridad y funcionamiento de proyectos e instalaciones de sistemas fotovoltaicos como la ANCE-ESP-02 para asegurar un correcto funcionamiento y durabilidad del sistema.

4.2.2 Balance de Energía

Para la etapa del balance energético se resta la cantidad de energía generada por el aprovechamiento integral de la energía solar al considerar diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, a la demanda de energía que se requiere en la vivienda.

Según el criterio de aceptación para considerar un edificio como sustentable energéticamente, para este caso de estudio con bioclima cálido seco si se cumple con una generación de energía excedente de 865.071 kWh/añal de los que requiere la vivienda de interés social ubicada en Cd. Juárez, Chihuahua, para funcionar en condiciones normales a lo largo del año, por lo cual es una vivienda con nivel de sustentabilidad tipo **Plus Energy**, como se muestra en la Tabla 4.49.

Tabla 4.49 Balance de energía, para el caso de estudio en Cd. Juárez

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	-2290
Gas para el calentamiento de agua**	-2014.22
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	+4741.3
Energía por la envolvente del edificio (+/-)****	+400
Energía ahorrada con iluminación natural*****	+27.991
Balance de Energía	+865.071

Fuente:*Considerando línea base de consumo de energía eléctrica para Chihuahua (Morillón, 2009); **Aplicando el uso de CSA quedando a cubrir 164.8 kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para el D.F. (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kg gas/añal a kWh/añal = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Cd. Juárez, Chihuahua (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011; *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

El excedente de energía fue alto debido al enorme potencial de energía solar disponible en el bioclima cálido seco, sin embargo, la cantidad de módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer la demanda energética es elevada y poco viable económicamente, se propone como en el caso anterior sustituir la línea base de consumo energético por una línea de consumo energético eficiente (Morillón, 2007).

Tabla 4.50 Consumo energético final anual (kWh/año) considerando una línea de consumo energético eficiente, para el caso de estudio en Cd. Juárez

	Línea base (kWh/año)	Ahorro anual* (kWh/año)	Consumo final de energía con uso de tecnología eficiente (kWh/año)
Aire Acondicionado	1007.6	636.0	371.6
Iluminación /Electrodom.	755.7	156.0	599.7
Refrigerador	320.6	247.08	73.52
Otros	206.1	-----	206.1
Total*	2290	1039.08	1250.92
Boiler	4752	1381.11	3370.9

Fuente: Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable (Morillón, 2007); Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009); *Sustituir focos incandescentes por LFC, sustituir refrigerador con antigüedad de 10 o más años, sustituir aire acondicionado (A.A.) convencional por A.A. eficiente, sustituir boiler convencional por boiler instantáneo termostático

Por la disminución en la demanda de gas para calentamiento de agua (boiler instantáneo termostático) y de la demanda de energía eléctrica al considerar tecnología eficiente (uso de LFC, refrigerador no mayor a 10 años de antigüedad y A.A. eficiente), se reduce a 6 módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer dicha demanda, se realizan los ajustes necesarios y se vuelve a realizar el balance de energía:

Tabla 4.51 Balance de energía, para el caso de estudio en Cd. Juárez

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	-1250.92
Gas para el calentamiento de agua**	-633.11
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	+2370.67
Energía por la envolvente del edificio (+/-)****	+371.6
Energía ahorrada con iluminación natural*****	+27.991
Balance de Energía	+886.231

Fuente:*Considerando línea de consumo eléctrico eficiente para Chihuahua (Morillón, 2007); **Aplicando el uso de CSA y un boiler instantáneo termostático quedando a cubrir 51.8 kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para el D.F. (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kg gas/anual a kWh/anual = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Cd. Juárez, Chihuahua (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011, tomando como valor máximo de ahorro al consumo por el uso final del aire acondicionado proporcionado por la línea eficiente de consumo eléctrico; *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

Aún con la reducción al 50% de los módulos fotovoltaicos, se mantiene un nivel de sustentabilidad **Plus Energy** para Cd. Juárez (bioclima cálido seco), Chihuahua.

4.2.2.1 Beneficios ambientales

Para cuantificar los beneficios ambientales que se pueden lograr mediante el aprovechamiento de la energía solar, se presenta la Tabla 4.52:

Tabla 4.52 Mitigación de kg de CO₂/año al ambiente, para el caso de estudio en Cd. Juárez

Consumo energético final	Energía abastecida con energía solar/año (kWh/año)	Factor de conversión de kWh a kg de CO ₂ según el tipo de consumo energético final**	Mitigación de kg de CO ₂ /año
Energía eléctrica	2290	0.385	881.65
Calentamiento de agua	2737.77*	0.234	640.64
			TOTAL: 1522.29

Fuente: *Aplicando el uso de CSA se ahorran 224 kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para Chihuahua (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kg gas/año a kWh/año = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; **Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Aragón, España

Se considera la línea base de consumo energético (Morillón, 2009), para determinar la mitigación de kgCO₂/año con el aprovechamiento de la energía que abastece de manera total las necesidades por consumo de energía eléctrica y de manera parcial las necesidades por consumo de gas para calentamiento de agua.

4.3 Entorno con clima cálido húmedo: Playa del Carmen, Quintana Roo

A continuación se presenta la validación del método para una vivienda de interés social ubicada en Playa del Carmen, Quintana Roo, siguiendo el mismo procedimiento que en los casos de estudio anteriores, para cubrir los tres climas que comprenden la mayor parte del territorio mexicano los cuales son templado, cálido seco y cálido húmedo, se simplifican algunos pasos para fines prácticos.

4.3.1 Estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares

Con información del entorno y mediante el diagnóstico que comprende el estudio del bioclima y de la radiación solar, se proponen estrategias y recomendaciones, aprovechando la energía solar en forma pasiva y activa.

4.3.1.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva

4.3.1.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

4.3.1.1.1.1 Control Solar

Una de las estrategias para climatizar pasivamente es aprovechando o evitando la energía solar mediante el control solar conforme los datos horarios de sensación higrotérmica proporcionados por el diagrama de isorequerimientos. Se consideran los ángulos óptimos calculados en el trabajo de modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios (Mejía y Morillón, 2004) para Playa del Carmen, Quintana Roo:

Tabla 4.53 Ángulos óptimos para control solar en Playa del Carmen

Dispositivo / Orientación	Norte	Este	Sur	Oeste
Alero	70°	45°	50°	0°
Partesol	25°		27°	

Fuente: Método de modelo de diseño y evaluación solar (Mejía y Morillón, 2004)

4.3.1.1.1.2 Materiales de construcción adecuados para la envolvente del edificio

i. Definir las generalidades del edificio proyectado

Se utilizan las características de la vivienda seleccionada para los casos de estudio anteriores donde se cuenta con 59 m² de superficie, ubicada de norte a sur, cuenta con una sala-comedor, una cocina, un baño y medio, dos recamaras, un patio de servicio y un cajón de estacionamiento, considerando el mismo sistema constructivo de los casos anteriores.

ii. Ganancia de calor por la envolvente

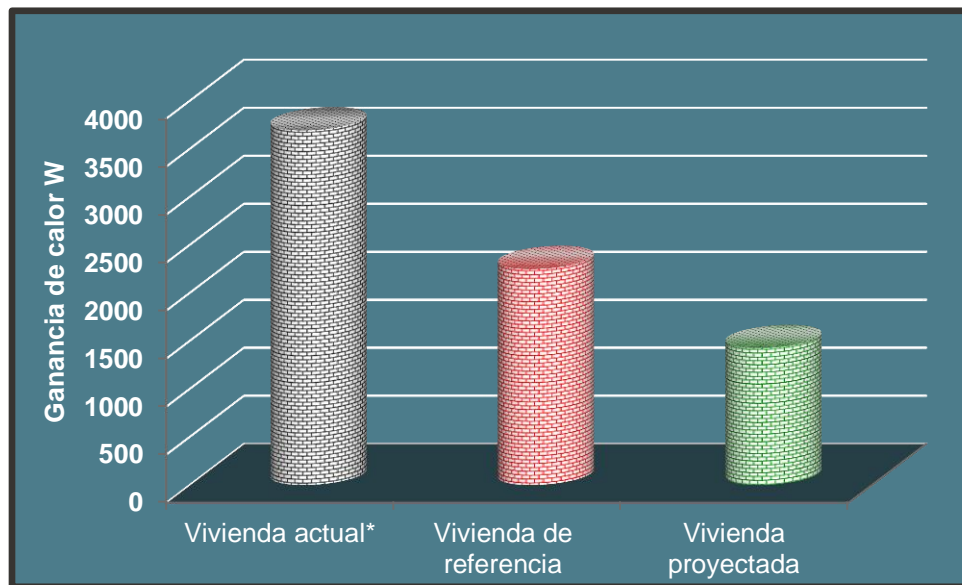
Los resultados de las ganancias de calor por conducción, convección y radiación de la vivienda de referencia y proyectada, se presentan a continuación:

Tabla 4.54 Comparación de ganancia total de la envolvente en la vivienda proyectada con la de referencia

	Ganancia por conducción y convección** (W)	Ganancia por radiación (W)	Total (W)
Vivienda de Referencia*	1134.77	1113.81	2248.58
Vivienda Proyectada	1152.6	273.2	1425.8
Diferencia	-17.83	+840.6	+822.78

Fuente: Elaborada en herramienta para cálculo de la NOM-020-ENER-2011, Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía; *Vivienda de referencia caracterizada según la NOM-020-ENER-2011; **El fenómeno de la convección se considera para el cálculo del comportamiento térmico de los materiales mediante el uso del coeficiente de convección exterior e interior

La ganancia de calor total de la vivienda proyectada es de 1425.8 W, por lo tanto es 822.78 W más eficiente respecto a la vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011, la disminución de las ganancias por radiación en la vivienda proyectada fue de 840.6 W debido a la consideración de aleros de protección y de ventanas con filtros solares para evitar las ganancias térmicas en temporadas de calor y las pérdidas de calor concentradas en el edificio en temporadas de frío.



Gráfica 4.5 Comparación de la ganancia de calor total en la vivienda proyectada con materiales propuestos para conservar o provocar confort contra vivienda de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011 y la vivienda actual*

Fuente: Elaborada con datos obtenidos de la Tabla 4.54; *Considerando los materiales más utilizados a nivel nacional para muros: tabique, ladrillo, block, piedra, cantera, cemento o concreto, y, para techos: losa de concreto, tabique, ladrillo o terrado con vigería, en el bioclima cálido húmedo. Morillón D., (2012), Evaluación de las tecnologías, Grupo de Tecnologías Sustentables - Instituto de Ingeniería de la UNAM, México.

4.3.1.1.1.3 Beneficios energéticos por el uso del control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas de la envolvente

Posterior a la evaluación térmica, se calcula el impacto energético anual que se tiene al dejar de utilizar los sistemas de aire acondicionado por la reducción de la carga de calor al interior de la vivienda (Andrade y Morillón, 2007), a continuación se presentan los resultados:

Tabla 4.55 Ahorro de energía eléctrica anual mostrado en la vivienda proyectada respecto a la de referencia*, por la disminución del uso de aire acondicionado, para P. del Carmen

Diferencia entre la vivienda proyectada (+) y la vivienda de referencia (kWh eléctricos)	Total de horas de calor anual (se requiere aire acondicionado)	Consumo de kWh/año de eléctricos evitados en la vivienda proyectada
0.2632	6276	1652.35

Fuente: Elaboración propia con datos de la evaluación térmica y del diagrama de isorrequerimientos;*Vivienda de referencia según la NOM-020-ENER-2011

En este bioclima se observa un beneficio considerable, evitando la utilización de equipos de aire acondicionado y ventilación, mostrando en la vivienda proyectada respecto a la vivienda de referencia un ahorro de 1652.35 kWh/año, sin embargo, se tomará como valor máximo de ahorro al consumo por el uso final del aire acondicionado proporcionado por la línea base de consumo eléctrico que es de 998.8 kWh/año. Es un bioclima que cuenta con una sensación higrotérmica predominante de calor, donde el diseño bioclimático en las viviendas con bioclima cálido húmedo es indispensable para alcanzar la sustentabilidad energética en los edificios.

4.3.1.1.2 Iluminación natural

Se evalúa el potencial de la iluminación natural mediante el conocimiento de la iluminancia exterior en superficies horizontales y verticales en su componente global y difusa, posteriormente se propone como aprovechar la iluminación natural directa o indirecta en los edificios concluyendo con algunos de los beneficios energéticos que se tiene al utilizar la iluminación natural en los edificios.

4.3.1.1.2.1 Evaluación del potencial de la iluminación natural

Para el cálculo de la iluminación natural en interiores se requiere conocer la disponibilidad de la luz natural exterior en las cuatro paredes que rodean a un edificio, debido a ello se estima la iluminancia exterior en las cuatro fachadas

principales (norte, sur, este y oeste). En las tablas 4.56 y 4.57 se muestra la estimación de la iluminancia global y difusa promedio en superficie horizontal y en las cuatro fachadas verticales principales.

La iluminancia global y difusa promedio en superficies horizontales es mayor a cualquiera de las demás superficies verticales (fachada norte, sur, este y oeste) coincidiendo el mismo resultado en los tres casos de estudio.

Tabla 4.56 Iluminancia global promedio mensual (klux) en superficies horizontales y verticales, para Playa del Carmen

Mes / Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Ene	32.29	6.72	16.78	16.76	32.94
Feb	29.47	7.14	19.24	19.21	39.41
Mar	22.13	7.29	20.67	20.65	44.65
Abr	12.84	8.79	22.46	22.44	49.15
May	8.05	11.77	20.28	20.24	45.69
Jun	8.04	13.91	18.72	18.68	42.52
Jul	7.98	11.66	19.30	19.25	43.09
Ago	12.21	8.67	19.78	19.76	43.53
Sep	20.06	7.77	18.35	18.31	39.91
Oct	28.33	7.65	18.24	18.20	37.64
Nov	33.39	7.03	17.24	17.20	34.03
Dic	34.44	6.60	16.32	16.30	32.13

Fuente: Elaboración propia con datos de Biosol

Tabla 4.57 Iluminancia difusa promedio mensual (klux) en superficies verticales y horizontales, para Playa del Carmen

Mes / Fachada	Sur	Norte	Este	Oeste	Horizontal
Ene	16.84	6.72	10.78	10.80	17.67
Feb	15.92	7.14	11.90	11.91	19.96
Mar	13.45	7.29	12.76	12.78	22.23
Abr	10.10	8.29	14.28	14.30	25.20
May	8.02	10.02	14.40	14.42	27.05
Jun	8.04	11.40	14.01	14.03	27.11
Jul	7.97	10.07	14.32	14.34	27.17
Ago	10.29	8.42	14.34	14.36	26.42
Sep	14.12	7.77	13.05	13.07	24.34
Oct	17.22	7.65	12.59	12.60	21.90
Nov	17.67	7.03	11.25	11.26	18.64
Dic	16.97	6.60	10.29	10.30	16.90

Fuente: Elaboración propia con datos de Biosol

4.3.1.1.2.2 Aprovechamiento de la iluminación natural

En esta parte del trabajo se selecciona la iluminancia difusa de la fachada norte debido a que cuenta con los valores más bajos en comparación del resto de los valores de iluminancia difusa incidente en superficies verticales y horizontales, en este intervalo de tiempo se propone utilizar la iluminación natural indirecta (iluminancia difusa) evitando así la radiación (Figura 4.15):

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00						6.10	5.26					
07:00					9.45	10.49	9.59	7.06	4.80			
08:00				9.44	11.89	13.09	12.06	9.15	8.29	7.21		
09:00		9.50	9.97	10.38	13.43	13.98	13.64	10.90	10.42	10.36	9.30	
10:00	10.09	10.31	10.29	10.23	11.74	13.85	11.97	10.72	11.24	11.25	10.56	10.01
11:00	10.47	10.32	9.79	9.10	9.12	11.64	9.37	9.49	10.64	11.27	10.96	10.51
12:00	10.51	10.20	8.00	8.08	6.94	9.74	6.90	8.37	10.17	11.14	11.00	10.60
13:00	10.45	10.30	9.77	9.09	9.11	11.63	9.36	9.47	10.62	11.24	10.94	10.49
14:00	10.07	10.29	10.27	10.21	11.72	13.83	11.95	10.70	11.22	11.23	10.54	9.99
15:00	8.91	9.52	9.99	10.38	13.43	13.98	13.64	10.90	10.43	10.38	9.32	8.69
16:00	6.50	7.46	8.36	9.49	11.94	13.13	12.11	9.20	8.35	7.27	6.79	6.13
17:00	2.54	3.77	5.07	7.75	9.54	10.57	9.68	7.15	4.87	4.07	2.62	2.30
18:00	0.00	0.00	0.00	2.99	6.01	6.17	5.33	3.20	0.00	0.00	0.00	0.00

Figura 4.15 Valores de iluminancia difusa horaria de la fachada norte (klux), sobrepuestos en el DDI cuando se presentan sensaciones de calor y confort, para Playa del Carmen

Posteriormente es seleccionada la iluminancia global de la fachada norte debido a que cuenta con los valores más bajos en comparación del resto de los valores de iluminancia global incidente en superficies verticales y horizontales, en este intervalo de tiempo se propone iluminación natural directa (iluminancia global) provocando ganancias de calor que se pueden deducir en confort en la temporada de invierno, una forma de climatizar pasivamente (Figura 4.16):

Hora/Mes	ene	feb	mar	abr	may	jun	jul	ago	sep	oct	nov	dic
06:00	0.00	0.00	0.00	4.01	6.69			3.15	0.00	0.00	0.00	0.00
07:00	2.51	3.73	5.00	9.50						4.01	2.58	2.28
08:00	6.45	7.40	8.30								6.73	6.08
09:00	8.89											8.66
10:00												
11:00												
12:00												
13:00												
14:00												
15:00												
16:00												
17:00												
18:00												

Figura 4.16 Valores de iluminancia global horaria de la fachada norte (klux), sobrepuestos en el DDI cuando se presenta la sensación de frío, para Playa del Carmen

Se cuantifican los recuadros –horas- de la iluminancia difusa y global sobrepuestos en el diagrama de isorequerimientos para condiciones de frío, calor y confort (Figura 4.15 y 4.16), que cuentan con un valor de 0 klux, para nuestro caso es de 14 horas, equivalente al 8.97%, debido a ello, el 91.3% restante del tiempo de horas diurnas se puede suministrar iluminación natural directa o indirecta en sus componentes difusa o global en superficies horizontales y verticales, evitando las ganancias de calor en condiciones de calor y confort, así como captando iluminación directa en periodos de frío cuidando el deslumbramiento -156 recuadros representan el 100% de tiempo-.

4.3.1.1.2.3 Beneficios energéticos por el uso de la iluminación natural en los edificios

Son considerados los mismos criterios del caso anterior para esta parte del método, cuantificando que las horas totales que se tiene iluminancia según el tipo de iluminación natural requerida con valores >0 (klux) entre las 6:00 y 9:00 horas, en este caso de estudio es de 1248 horas, se multiplican por 23 W, potencia de una LFC.

La cantidad resultante en W se convierte a kWh obteniendo el siguiente resultado: 28.704 kWh/añual de ahorro es un valor modesto por los datos de subestimación propuestos del tiempo que puede aprovecharse la iluminación natural en sustitución de la iluminación artificial además de que se considera el ahorro con una LFC. Sin embargo, si se toma en cuenta el ahorro al dejar de utilizar un foco incandescente de 60 W por 1217 horas se tendría un ahorro de 74.88 kWh/añual por vivienda.

4.3.1.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón

4.3.1.1.3.1 Utilización del calentador solar de agua por línea base

Conociendo los niveles de irradiación solar en la región, se determina la factibilidad de aprovechar el calentamiento solar de agua en sustitución parcial o total del uso final por calentamiento de agua, se requiere conocer la línea base de consumo para calentamiento de agua (Morillón, 2009):

Tabla 4.58 Línea base por consumo final de gas LP (kg/año), para la vivienda en Q. Roo

Concepto	Línea base (kg/año)
Calentador de gas convencional	388.8

Fuente: Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009)

Igual que en los casos anterior se determina el área del colector solar, para Playa del Carmen es de 1.65 m² y se considera el uso de un boiler convencional con eficiencia del 74%.

4.3.1.1.3.2 Utilización del calentador solar de agua por tipo de clima

Otro factor que se puede considerar es el clima de la región, las características de cada clima permiten identificar las necesidades de calentamiento de agua con gas o si es calentamiento natural del agua al recibir de forma directa o indirecta radiación solar, para ello se considera la guía a seguir aplicada en el caso anterior y se sintetiza a continuación:

- ♦ Se cuantifican los recuadros con una temperatura $\geq 25^{\circ}\text{C}$ (Tabla 4.59), para Playa del Carmen es de 7 recuadros, que representa el 58.33% del tiempo establecido -12 recuadros representan el 100% del tiempo-, debido a ello la utilización de un calentador solar en esa región podría ser poco requerido (Tabla 4.30), y demandar de su uso principalmente en las primeras horas de la mañana y por la noche.

Tabla 4.59 Temperaturas medias mensuales y anuales en °C ($\geq 25^{\circ}\text{C}$), para Playa del Carmen

Elementos	En	Feb	Mzo	Abr	My	Jun	Jul	Ago	Sept	Oct	Nov	Dic	Anual
Temperatura media mensual	22.8	23.4	24.3	26.1	27.3	27.9	28	28	27.9	26.3	24.4	23.4	25.8

Fuente: Normales climatológicas

4.3.1.1.3.3 Beneficios energéticos por el uso del calentador solar de agua

Se toma como referencia la línea base de consumo final por gas para Playa del Carmen, Quintana Roo establecida en 388.8 kg/año (Morillón, 2009), por tanto, con el colector solar plano propuesto de 1.65 m² equivalente a un ahorro anual de gas de 218 kg/año, es posible cubrir gran parte de energía requerida para calentamiento de agua mediante el CSA, reduciendo 56.08% de consumo final por gas, dejando 170.8 kg/año para cubrir con gas equivalentes a 2664.44 kWh/año.

Adicionalmente para nuestro caso de estudio se orienta el colector solar plano hacia el sur por estar en latitud Norte con una inclinación de 20.63° correspondiente a su latitud para obtener un rendimiento mayor anual, el colector deberá cubrir algunas normas como lo es la NMX-ES-001-NORMEX-2005 y la NMX-ES-004-NORMEX-2010 para asegurar un correcto funcionamiento y durabilidad del sistema.

4.3.1.2 Sistemas Activos

4.3.1.2.1 Generación de energía eléctrica (Sistemas Fotovoltaicos)

4.3.1.2.1.1 Dimensionamiento del Sistema Fotovoltaico

Es utilizado el método para el dimensionamiento de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red (Sánchez, 2015), donde se sintetizan algunos pasos:

i. Información geográfica.

ii. Información energética. Para conocer el consumo de energía eléctrica diaria es tomada la línea base del consumo eléctrico anual (Morillón, 2009), dividiendo ese consumo de energía entre 365 (número de días en un año) y convirtiendo de kW a W (Tabla 4.60).

Tabla 4.60 Consumo final de energía eléctrica considerando una línea base, para Playa del Carmen, Quintana Roo

Consumo de energía eléctrica	
Consumo anual de energía eléctrica (año)	2270 kWh/año
Consumo de energía diaria (día)	6219.17 Wh/día

Fuente: Líneas base para la vivienda sustentable en México (Morillón, 2009)

iii. Consumo eléctrico total diario. Es obtenido dividiendo el consumo de energía eléctrica diaria (Wh/día) entre la eficiencia del inversor, considerándola en un 90%, más un factor de seguridad del 10%.

$$\text{Consumo eléctrico total diario} = \frac{6219.17 \text{ Wh/día}}{0.90} * 1.10 = 7601.22 \text{ Wh/día}$$

iv. Calculo del mes menos favorable. Este mes es calculado al dividir la irradiación global mensual entre el consumo de energía eléctrica total diaria, para este caso diciembre es el mes menos favorable (Tabla 4.61):

Tabla 4.61 Calculo del mes menos favorable, para Playa del Carmen

Mes / Concepto	Irradiación global Rg(kW/m ² día)	Consumo de energía eléct. total Ceet (Wh/día)	Rg / Ceet
Ene	3.858	7601.22	1970.06
Feb	4.588	7601.22	1656.43
Mar	5.211	7601.22	1458.64
Abr	5.638	7601.22	1347.99
May	5.225	7601.22	1454.77
Jun	4.850	7601.22	1567.25
Jul	4.925	7601.22	1543.38
Ago	4.994	7601.22	1521.92
Sep	4.622	7601.22	1644.48
Oct	4.383	7601.22	1734.10
Nov	3.994	7601.22	1902.93
Dic	3.777	7601.22	2012.07

v. **Elección de tipo de panel fotovoltaico.** Es seleccionado el mismo panel fotovoltaico del caso anterior.

vi. **Calculo de número de módulos y tipo de arreglo.** El número de módulos a utilizar se obtiene al dividir el cociente del mes menos favorable (2012.07) entre la potencia total del panel seleccionado (210W):

$$\text{No. de módulos} = \frac{2012.07}{210} = 9.58 \approx 10$$

vii. **Calculo de parámetros del sistema fotovoltaico.** En esta etapa se calcula la potencia total, voltaje máximo y corriente máxima:

$$\text{Potencia total} = 10 \text{ Mod} * 210\text{W} = 2100 \text{ W}$$

$$\text{Voltaje máximo} = \frac{18.30\text{V}}{1\text{Mod.Serie}} = 18.30 \text{ V}$$

$$\text{Corriente máxima} = 11.5\text{A} * 10 \text{ Mod Paralelo} = 115 \text{ A}$$

$$\text{Corriente total de corto circuito} = 12.10\text{A} * 10 \text{ Mod Paralelo} = 121 \text{ A}$$

$$\text{Voltaje total de circuito abierto} = \frac{22.80\text{V}}{1\text{Mod.Serie}} = 22.80\text{V}$$

$$\text{Voltaje generación} = \frac{24\text{V}}{1\text{Mod.Serie}} = 24\text{V}$$

4.3.1.2.1.2 Beneficios energéticos por el uso de Sistemas Fotovoltaicos

La energía neta generada anualmente para Playa del Carmen es de 1292.22 kWh/año.

Tabla 4.62 Cálculo de la energía eléctrica generada anualmente con el sistema fotovoltaico seleccionado, para Playa del Carmen

Mes / Concepto	Irradiación global Rg(kWh/m ² día)	Potencia total del sistema FV (kW)	Energía generada/día (kWh/día)	Energía generada/mes (kWh/mes)
Ene (31)	3.86	2.100	7.29	226.06
Feb (28)	4.59	2.100	8.67	242.85
Mar (31)	5.21	2.100	9.85	305.32
Abr (30)	5.64	2.100	10.66	319.73
May (31)	5.23	2.100	9.88	306.14
Jun (30)	4.85	2.100	9.17	275.00
Jul (31)	4.93	2.100	9.31	288.56
Ago (31)	4.99	2.100	9.44	292.63
Sep (30)	4.62	2.100	8.74	262.08
Oct (31)	4.38	2.100	8.28	256.82
Nov (31)	3.99	2.100	7.55	234.04
Dic (31)	3.78	2.100	7.14	221.34
				TOTAL = 3230.56 kWh/año

Adicionalmente para nuestro caso de estudio se orienta el sistema fotovoltaico hacia el sur por estar en latitud Norte con una inclinación de 20.63° correspondiente a su latitud para obtener un rendimiento mayor anual, se deberán cubrir especificaciones de seguridad y funcionamiento de proyectos e instalaciones de sistemas fotovoltaicos como la ANCE-ESP-02 para asegurar un correcto funcionamiento y durabilidad del sistema.

4.3.2 Balance de Energía

Para la etapa del balance energético se resta la cantidad de energía generada por el aprovechamiento integral de la energía solar al considerar diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, a la demanda de energía que se requiere en la vivienda (Tabla 4.63):

Según el criterio de aceptación de un edificio sustentable energéticamente, considerando las medidas propuestas se cumple con un nivel de sustentabilidad tipo eficiente en una vivienda de interés social ubicada en Playa del Carmen, Quintana Roo.

Tabla 4.63 Balance de energía, para el caso de estudio en Playa del Carmen

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	-2270
Gas para el calentamiento de agua**	-2087.06
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	+3230.56
Energía por la envolvente del edificio (+/-)****	+998.8
Energía ahorrada con iluminación natural*****	+28.704
Balance de Energía	-99

Fuente:*Considerando línea base para Playa del Carmen, Quintana Roo (Morillón, 2009); **Aplicando el uso de CSA quedando a cubrir 170.76 kg con GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para P. del Carmen (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kgGLP/anual a kWh/anual = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Playa del Carmen (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011, tomando como valor máximo de ahorro al consumo por el uso final del aire acondicionado proporcionado por la línea base de consumo eléctrico; *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

Con el objetivo de lograr un nivel de sustentabilidad energética de una manera económica y viable –reducir número de sistemas fotovoltaicos-, de igual forma que en los casos anteriores se propone sustituir la línea base de consumo energético por una línea de consumo energético eficiente (Morillón, 2007).

Tabla 4.64 Consumo energético final anual (kWh/año), considerando una línea de consumo energético eficiente, para el caso de estudio en Playa del Carmen

	Línea base (kWh/año)	Ahorro anual* (kWh/año)	Consumo final de energía con uso de tecnología eficiente (kWh/año)
Aire Acondicionado	998.8	636	362.8
Iluminación y Electrodomésticos	749.1	231.12	517.98
Refrigerador	317.8	247.08	70.72
Otros	204.3	-----	204.3
Total*	2270	1426.2	1155.8
Boiler	4752	1381.11	3370.9

Fuente: Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable (Morillón, 2007); Líneas base para la vivienda sustentable en México (2009); *Sustituir focos incandescentes por LFC, sustituir refrigerador con antigüedad de 10 o más años, sustituir aire acondicionado (A.A.) convencional por A.A. eficiente, sustituir boiler convencional por boiler instantáneo termostático

Por la disminución en la demanda de gas para calentamiento de agua (boiler instantáneo termostático) y de la demanda de energía eléctrica al considerar tecnología eficiente (uso de LFC, refrigerador no mayor a 10 años de antigüedad y A.A. eficiente), se reduce el número de módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer dicha demanda, se realizan los ajustes necesarios y se vuelve a realizar el balance de energía:

Tabla 4.65 Balance de energía, para el caso de estudio en Playa del Carmen

Concepto	kWh/año
Energía eléctrica por aparatos electrodomésticos*	-1155.8
Gas para el calentamiento de agua**	-706.44
Energía generada por el sistema fotovoltaico propuesto***	+1938.33
Energía por la envolvente del edificio (+/-)****	+362.8
Energía ahorrada con iluminación natural*****	+28.704
Balance de Energía	+467.6

Fuente:*Considerando línea de consumo eléctrico eficiente (Morillón, 2007) para Playa del Carmen, Quintana Roo; **Aplicando el uso de CSA y de boiler instantáneo termostático quedando a cubrir 57.8 kg con GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para P. del Carmen (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kgGLP/anual a kWh/anual = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; ***Dimensionado para sistemas fotovoltaicos interconectados a la red aplicado al caso de estudio de Playa del Carmen (Sánchez, 2015); ****Ganancia de calor positiva obtenida en la vivienda proyectada contra una de referencia caracterizada por la NOM-020-ENER-2011, tomando como valor máximo de ahorro al consumo por el uso final del aire acondicionado proporcionado por la línea eficiente de consumo eléctrico; *****Ahorro de energía eléctrica anual al utilizar la iluminación natural

Con la corrección en la demanda de energía al utilizar tecnología eficiente, aún con la disminución de paneles fotovoltaicos se obtuvo un balance con energía excedente de 467.6 kWh/año de los que requiere la vivienda de interés social ubicada en Playa del Carmen (bioclima cálido húmedo), Quintana Roo, para funcionar en condiciones normales a lo largo del año, por lo cual es una vivienda con nivel de sustentabilidad tipo **Plus Energy**.

4.3.2.1 Beneficios ambientales

Para cuantificar los beneficios ambientales que se pueden lograr mediante el aprovechamiento de la energía solar, se presenta la Tabla 4.66:

Tabla 4.66 Mitigación de kg de CO₂/año al ambiente, para el caso de estudio en Playa del Carmen

Consumo energético final	Energía abastecida con energía solar/año (kWh/año)	Factor de conversión de kWh a kg de CO ₂ según el tipo de consumo energético final**	Mitigación de kg de CO ₂ /año eq
Energía eléctrica	2270	0.385	873.95
Calentamiento de agua	2664.44*	0.234	623.48
			TOTAL: 1497.43

Fuente: *Aplicando el uso de CSA se ahorran 218 kg GLP/año basado en el consumo final de gas de 388.8 kg/año para Q. Roo (Morillón, 2009) –Factor de conversión de kg gas/año a kWh/año = (Consumo gas anual * Poder calorífico del gas 44MJ) /3.6-; **Fondo Europeo de Desarrollo Regional, Aragón, España

Se considera la línea base de consumo energético (Morillón, 2009), para determinar la mitigación de kgCO₂/año eq con el aprovechamiento de la energía que abastece de manera total las necesidades por consumo de energía eléctrica y de manera parcial las necesidades por consumo de gas para calentamiento de agua.

5.0 Beneficios en los climas cálido seco, cálido húmedo y templado al definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios: energéticos, ambientales y económicos

En este apartado se muestran los beneficios energéticos, ambientales y económicos por definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios considerando diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica, para los casos de estudio situados en las ciudades con los climas más representativos en la República Mexicana -templado, cálido seco y cálido húmedo- en una vivienda de interés social.

El punto de partida fue conocer información de una línea base de consumo de energía (Morillón, 2009), así como de un diagnóstico: estudio del bioclima y estudio del recurso solar.

Posteriormente se propusieron estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares, se dividieron por tipo de aprovechamiento de la energía solar: en forma pasiva con la utilización de calentadores solares de agua, iluminación natural, materiales de construcción adecuados y control solar, y en forma activa con la generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos.

Al final de cada caso de estudio se realizó un balance de energía, que es una comparación de la demanda de energía establecida por una línea base de consumo energético contra la generada con energía solar, el resultado determina el nivel de sustentabilidad alcanzado, para obtener resultados con mejores beneficios energéticos se realizaron ajustes al considerar una línea de consumo energético eficiente. Adicionalmente se cuantifican los beneficios ambientales por la mitigación de CO₂ para cada caso de estudio comparados con la emisión de CO₂ en una vivienda convencional y finalmente se muestran algunos de los beneficios económicos que se obtienen.

A continuación se presentan los beneficios energéticos, por el aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva y activa, siguiendo con los beneficios mostrados en el balance energético, y, finalizando con los beneficios ambientales y económicos.

5.1 Beneficios energéticos

5.1.1 Aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva

5.1.1.1 Control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas en la envolvente

Se determinaron los ángulos óptimos de los dispositivos de control solar para las principales fachadas, mediante el Modelo de diseño y evaluación del control solar en edificios (Mejía y Morillón, 2004) así como se consideraron ventanas con filtros solares y se seleccionaron materiales de construcción acordes a los requerimientos de climatización y disponibles en el lugar de análisis considerando el trabajo de Materiales y sistemas constructivos usados en techos y muros de la vivienda en México (Morillón et al., 2011) y la NOM-020-ENER-2011. Al aplicar ambas medidas de control solar y el uso de materiales de construcción adecuados -considerando el uso de ventanas con filtros solares-, se evaluaron las ganancias por radiación, convección y conducción en superficies transparentes y opacas, los resultados de la evaluación de la vivienda proyectada se compararon con una vivienda de referencia definida por la NOM-020-ENER-2011 (Gráfica 5.3). El bioclima templado presentó 31.12% más eficiencia en la vivienda proyectada comparada con la de referencia, seguido por el bioclima cálido húmedo con 36.59%, siendo el bioclima cálido seco el que presenta mayor porcentaje de eficiencia con 47.42%.

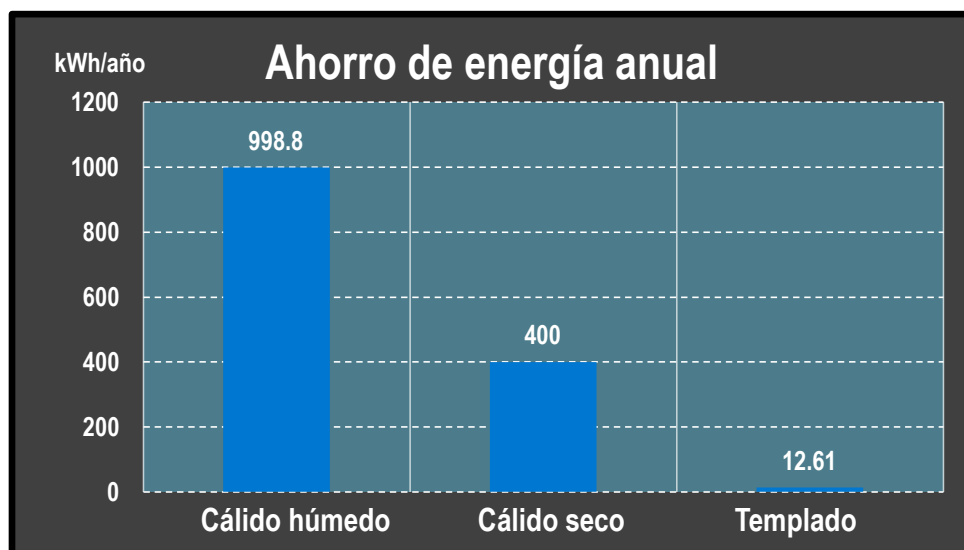


Gráfica 5.1 Evaluación térmica de la vivienda proyectada contra la vivienda de referencia* en los casos de estudio.

Fuente: Elaboración propia considerando la vivienda de referencia según NOM-020-ENER-2011

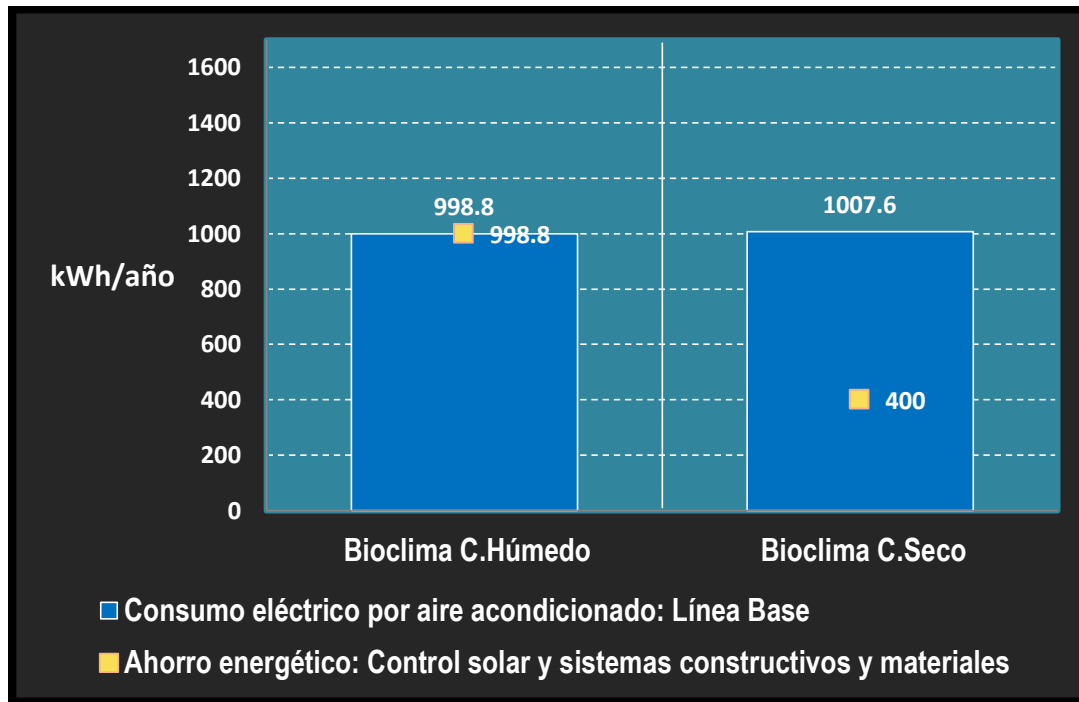
Para exponer los beneficios energéticos por el control de ganancias o pérdidas térmicas en superficies transparentes y opacas de la envolvente, los ahorros presentados en la vivienda proyectada respecto a la de referencia proporcionados en $\text{Watts}_{\text{térmicos}}$ se convirtieron a $\text{kWh}_{\text{eléctricos}}$ y se multiplicaron por las horas en las que se presenta la sensación de calor al año según datos del DDI, tiempo en el que se evitaría utilizar aire acondicionado o ventilación mecánica.

Considerando el criterio que se propone en este apartado para cuantificar los beneficios energéticos, el bioclima que presenta mayor tiempo la sensación de calor en el DDI correlacionado al ahorro en la evaluación térmica de la vivienda proyectada con la de referencia es el bioclima que alcanza los mayores beneficios energéticos, para los casos de estudio es el bioclima cálido húmedo ahorrando 998.8 kWh/año, seguido por el cálido seco con 400 kWh/año y el bioclima templado el que presenta los menores beneficios al evitar utilizar 12.61 kWh/año (Gráfica 5.2).



Gráfica 5.2 Ahorro energético por la utilización del control de ganancias o pérdidas térmicas en superficies transparentes y opacas de la envolvente para los casos de estudio

Además, se comparó el consumo energético por el uso final del aire acondicionado determinado por una línea base frente al ahorro energético anual de los bioclimas cálidos por el uso del control solar y materiales de construcción adecuados, no se compararon los ahorros presentados en el bioclima templado debido a que la línea base para esa ciudad no considera el uso final del aire acondicionado (Gráfica 5.3).



Gráfica 5.3 Consumo eléctrico anual por el uso final del aire acondicionado determinado por una línea base Vs el ahorro energético anual por el uso del control solar y materiales de construcción adecuados

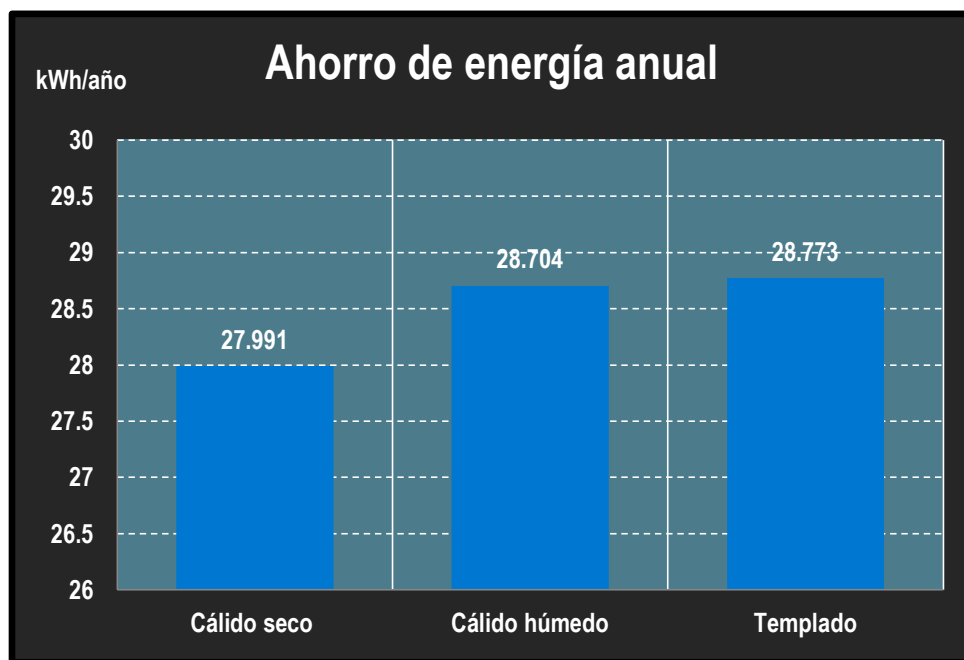
Con los ahorros energéticos mostrados principalmente en los bioclimas cálidos al reducir ampliamente la necesidad del uso de aire acondicionado, se reafirma la importancia que tiene considerar medidas de control solar y materiales de construcción adecuados correspondiente a las necesidades específicas de cada bioclima.

5.1.1.2 Iluminación natural

Para el aprovechamiento de la iluminación natural, se estimaron los valores de iluminancia global y difusa para superficies verticales y horizontales (Preciado y Morillón, 2010). Al cuantificar el potencial de la iluminación natural exterior se conoce su disponibilidad en las diferentes fachadas y techo de la vivienda, posteriormente se definió como aprovechar la iluminación natural de forma directa (iluminancia global) o indirecta (iluminancia difusa) donde además de cubrir los requerimientos lumínicos de la vivienda se cubren de manera parcial las necesidades de climatización en horas diurnas, es decir, conservar o provocar una sensación de confort en el usuario. El porcentaje de horas diurnas que se puede aprovechar la iluminación natural directa e indirecta para los casos de estudio es similar, para el bioclima templado y cálido seco es 91.3%, mientras que para el bioclima cálido seco es de 89.75%.

En los casos de estudio se consideró la sustitución de una lámpara fluorescente compacta de 23 W de potencia por iluminación natural, mostrando beneficios energéticos similares entre el bioclima templado y el cálido húmedo relacionados al porcentaje de horas diurnas aprovechables con iluminación natural con ahorros de 28.773 kWh/año y de 28.704 kWh/año respectivamente, mientras que en el bioclima cálido seco se tiene un ahorro de 27.991 kWh/año apenas por debajo de los otros dos bioclimas (Gráfica 5.4).

Para conocer de manera más precisa los beneficios energéticos de la iluminación natural en sustitución de iluminación artificial, es preciso conocer el horario promedio mensual en que es utilizada la iluminación artificial dentro del edificio de estudio cuando se dispone de iluminación natural –horas diurnas–.

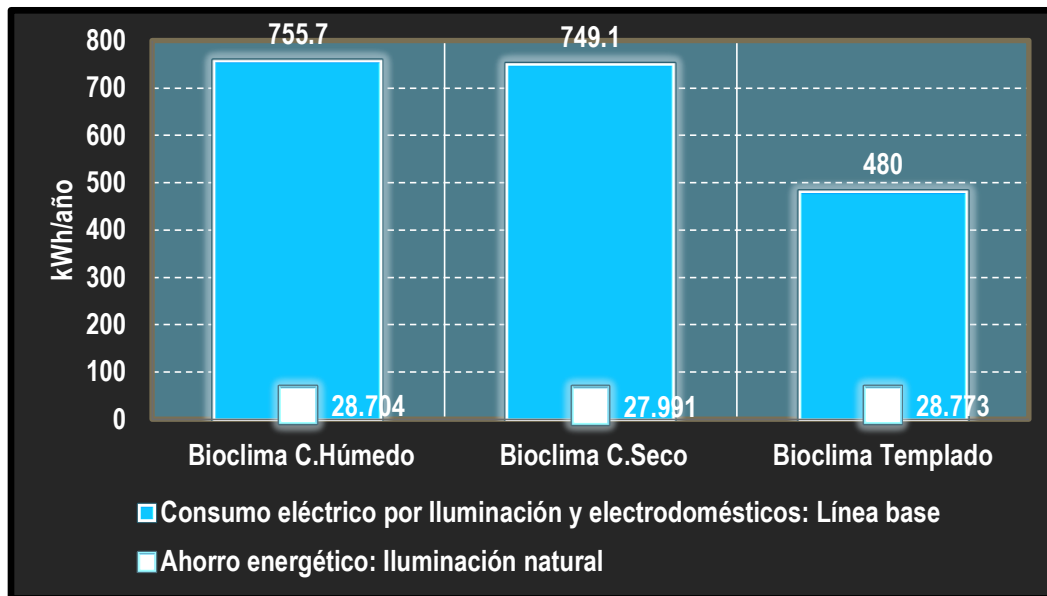


Gráfica 5.4 Ahorro energético por la utilización de la iluminación natural para los casos de estudio

Se comparó el consumo energético por el uso final de la iluminación determinado por una línea base frente al ahorro energético anual de los casos de estudio por el uso de la iluminación natural, donde se obtuvieron ahorros similares en los casos de estudio por la propuesta de sustituir una LFC de 23 W con iluminación natural (Gráfica 5.5).

Es calculado el índice de consumo de energía eléctrica (ICEE) por iluminación en el bioclima templado, debido a que su línea base considera el uso final de la iluminación de manera particular a diferencia de los bioclimas cálidos que

conjuntan la iluminación y los electrodomésticos, por el comportamiento semejante por el uso final de la iluminación, el resultado del bioclima templado se toma como referencia para los otros casos de estudio (Tabla 5.1).



Gráfica 5.5 Consumo eléctrico anual por el uso final de la iluminación y electrodomésticos determinado por una línea base Vs el ahorro energético anual por el uso de la iluminación natural

Tabla 5.1 Índices de consumo de energía eléctrica por iluminación, para el bioclima templado

Bioclima	ICEE por Iluminación en la vivienda (kWh/m ² año)*	ICEE al reducir consumo final por iluminación en la vivienda (kWh/m ² año)**	Eficiencia lograda con iluminación natural (%)
Templado	8.13	7.64	6.02

Fuente: *Considerando consumo por uso final de la iluminación de una línea base (Morillón, 2009); **Diferencia entre uso final de la iluminación de la línea base y del ahorro de energía por el uso de la iluminación natural

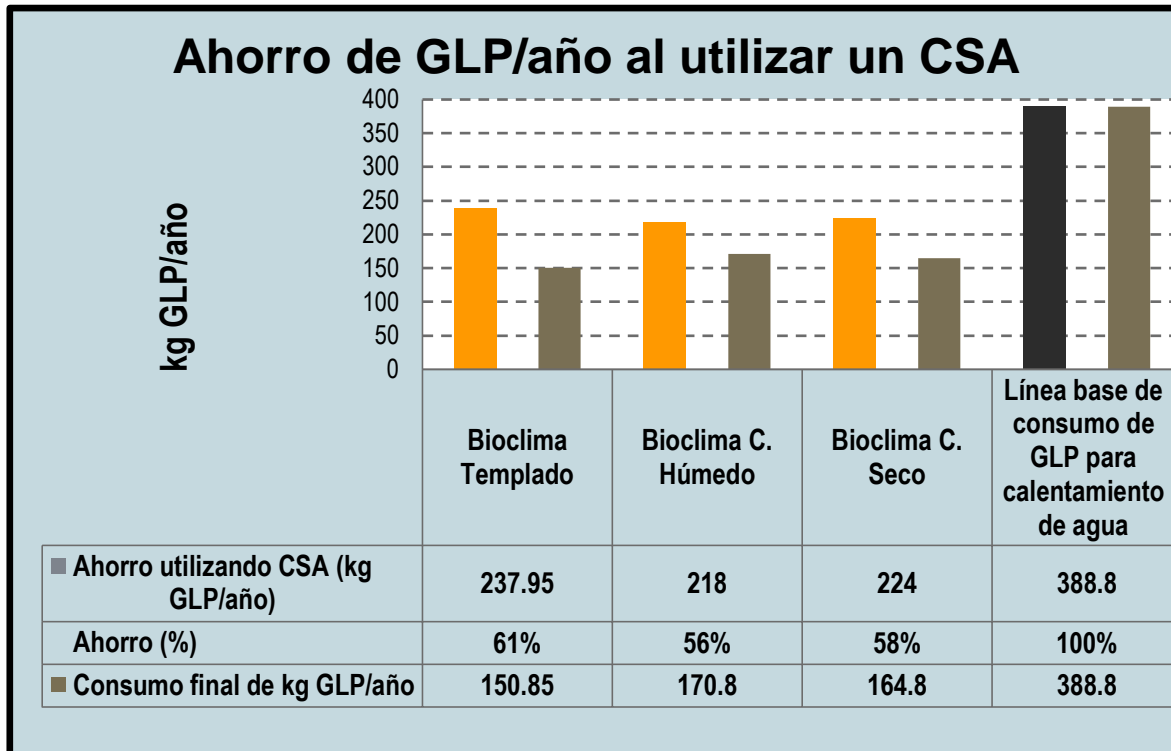
La eficiencia alcanzada al considerar el ahorro energético por el aprovechamiento de la iluminación natural en los ICEE por iluminación de 6.02% es reservada, sin embargo, los beneficios pueden mejorar si se realiza un diseño lumínico que considere la sustitución de más de un foco incandescente o LFC.

5.1.1.3 Calentamiento solar de agua por termosifón

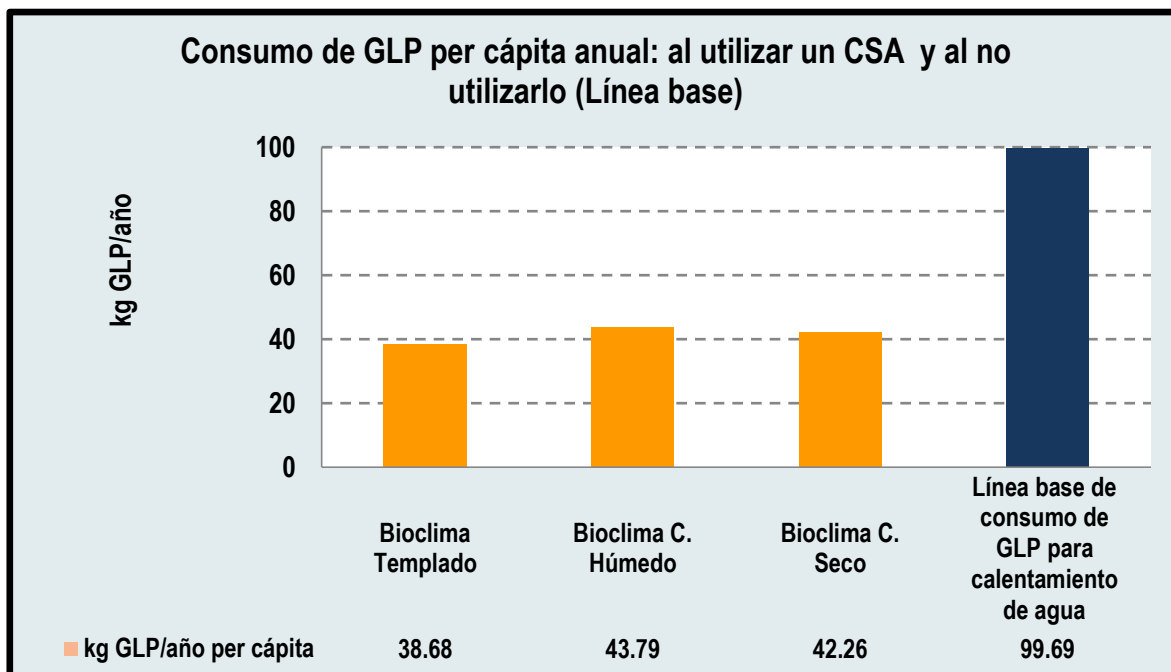
Para dimensionar el colector solar plano de cobre para calentamiento de agua se tomó como referencia la línea base por consumo final de gas para calentamiento de agua en las viviendas de 388.8 kg GLP/año (Morillón, 2009), entonces para cubrir las necesidades de calentamiento de agua para 3.9 personas por vivienda (INEGI, 2015), se realizó el dimensionado del colector solar plano (Ramos y Patiño, 2006), donde los bioclimas cálidos requieren un área del calentador solar de 1.65 m² y para el bioclima templado de 2 m², en los tres casos de estudio se consideró un tanque de almacenamiento de 150-180 litros.

En el bioclima templado se requiere una área mayor del colector solar plano debido a sus características específicas como presentar el menor número de horas con sensación de calor y la sensación predominante es la de frío, mientras que en los bioclimas cálidos la sensación de calor es considerablemente mayor. Al utilizar el calentador solar plano, la cantidad de gas a cubrir por calentamiento de agua disminuye 61.2%, 56% y 57.61% en los bioclimas templado, cálido húmedo y cálido seco, mostrando mayor eficiencia en el bioclima templado porque su área es mayor comparada con los CSA de los bioclimas cálidos. En los casos de estudio se presentan eficiencias que exceden más de 50% para satisfacer necesidades de calentamiento de agua por el uso del CSA (Gráfica 5.6).

Se determinó el consumo de gas per cápita en una vivienda con 3.9 habitantes (INEGI, 2010), considerando el consumo final de gas anual al utilizar un CSA en los casos de estudio y comparado con una línea base de consumo de gas por calentamiento de agua (Gráfica 5.7), con el objetivo de facilitar la proyección de los beneficios energéticos que se podrían lograr a nivel nacional por el uso del calentador solar de agua de acuerdo a las características específicas de cada bioclima.



Gráfica 5.6 Ahorro de kg GLP/año en los casos de estudio, utilizando calentador solar plano comparado con el consumo de gas por calentamiento de agua definido por la línea base. Fuente: Elaboración propia considerando: *Líneas base para la vivienda sustentable en México, Informe Técnico, Banco Mundial (Morillón, 2009)



Gráfica 5.7 Consumo de GLP/año per cápita: utilizando calentador solar plano Vs consumo de gas por calentamiento de agua definido por la línea base

5.1.2 Aprovechamiento de la energía solar en forma activa

5.1.2.1 Sistemas fotovoltaicos

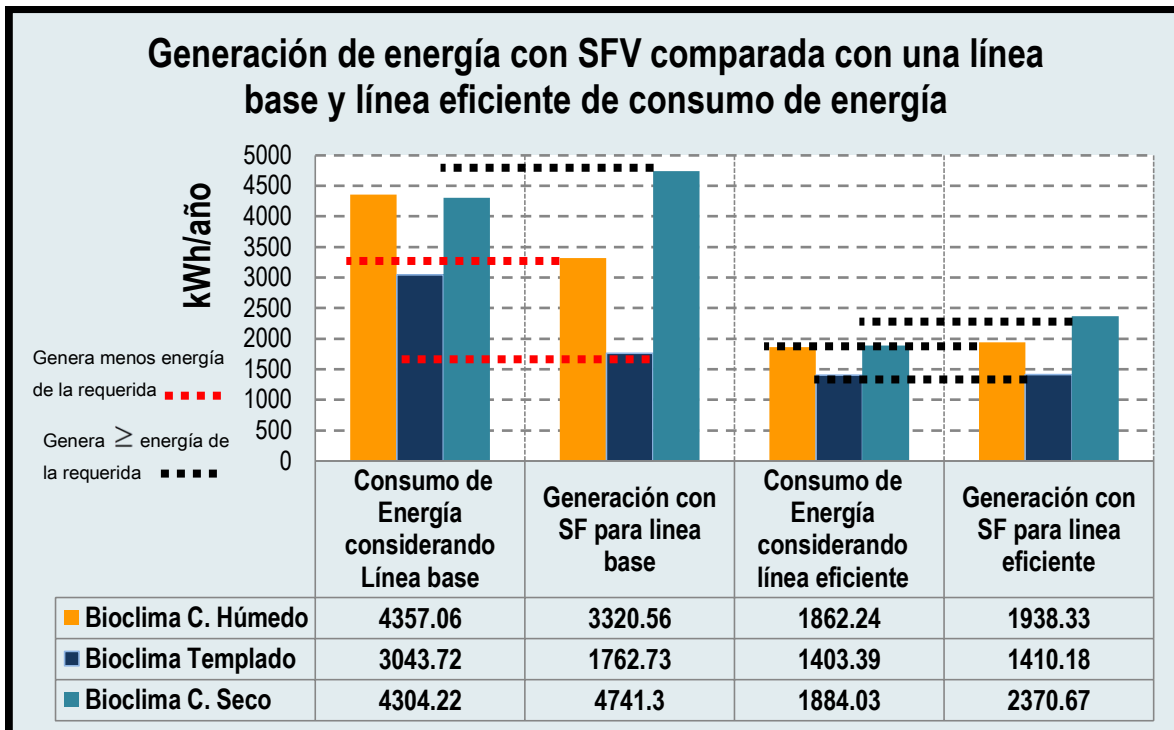
Para el dimensionado de los sistemas fotovoltaicos que debían utilizarse en la vivienda se consideró una línea base de consumo energético (Morillón, 2009), e información de la irradiación global diaria promedio mensual (Almanza et al., 2005), donde el bioclima templado requiere 5 módulos fotovoltaicos (1050 Wp), el cálido húmedo requiere 10 (2100 Wp) y el cálido seco requiere de 12 módulos fotovoltaicos (2520 Wp), los bioclimas cálidos requieren un gran número de módulos fotovoltaicos para cubrir las necesidades de la línea base por consumo de energía eléctrica principalmente por el uso final del aire acondicionado aumentando bastante los costos de financiamiento.

Debido al excesivo número de módulos fotovoltaicos necesarios para satisfacer la línea base de consumo energético y porque en los bioclimas cálido húmedo y templado no se obtuvo un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable o plus, se redimensionaron los sistemas fotovoltaicos pero considerando una línea eficiente de consumo energético⁴⁴, reduciendo a 4 módulos fotovoltaicos para el bioclima templado, mientras que para los bioclima cálido seco y cálido húmedo se requieren 6 módulos fotovoltaicos, en los bioclimas cálidos se redujo al menos 40% el número de módulos requeridos para abastecer una línea eficiente de consumo energético comparada con la línea base de consumo energético.

La energía que se generó con los sistemas fotovoltaicos está directamente relacionada con la cantidad de irradiación global anual incidente en cada lugar, debido a eso el bioclima cálido húmedo es el que presenta los índices de generación de energía más bajos, seguido por el bioclima templado, y como mayor generador de energía eléctrica se encuentra el bioclima cálido seco que demuestra tener los mayores índices de irradiación global anual promedio (Gráfica 5.8).

Los beneficios son evidentes al considerar una línea eficiente de consumo energético, donde además de reducir el número de SFV para cubrir la demanda energética se le da un uso adecuado a la energía al considerar tecnología eficiente. En el bioclima cálido seco se logró generar más energía de la requerida al dimensionar los SFV para una línea base y una línea eficiente demostrando el vasto potencial del recurso solar de ese bioclima, sin embargo, aún falta considerar los ahorros obtenidos de manera integral y compararlos con las líneas base y eficiente, los resultados se muestran en la siguiente sección.

⁴⁴ Morillón D. Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable en México, 2007.



Gráfica 5.8 Representación gráfica de la generación de energía eléctrica con SFV comparada con una línea base (electricidad y GLP a cubrir utilizando el CSA) y una línea eficiente de consumo de energía (electricidad y GLP a cubrir utilizando tecnología eficiente así como el CSA) para los casos de estudio

5.1.3 Balance de energía general

La información que proporcionó el diagrama de isorrequerimientos y el potencial del recurso solar, es específica para cada bioclima y determinaron en gran medida la cantidad de energía generada y ahorrada en la vivienda aprovechando integralmente la energía solar, mientras que para la energía demandada en la vivienda se consideró una línea base de consumo energético, y, al realizar la diferencia entre la energía generada menos la demanda de energía (Sartori, 2010) se determinó el nivel de sustentabilidad alcanzado.

El bioclima cálido seco fue el único en lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo Plus Energy, principalmente por su vasta generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos, donde el factor de la irradiación global es suficiente para que este bioclima presente los mayores beneficios energéticos por aprovechar integralmente la energía solar, teniendo un excedente de energía de 865.071 kWh/año, mientras que en los bioclimas cálido húmedo y templado se logró únicamente un nivel de sustentabilidad tipo Eficiente.

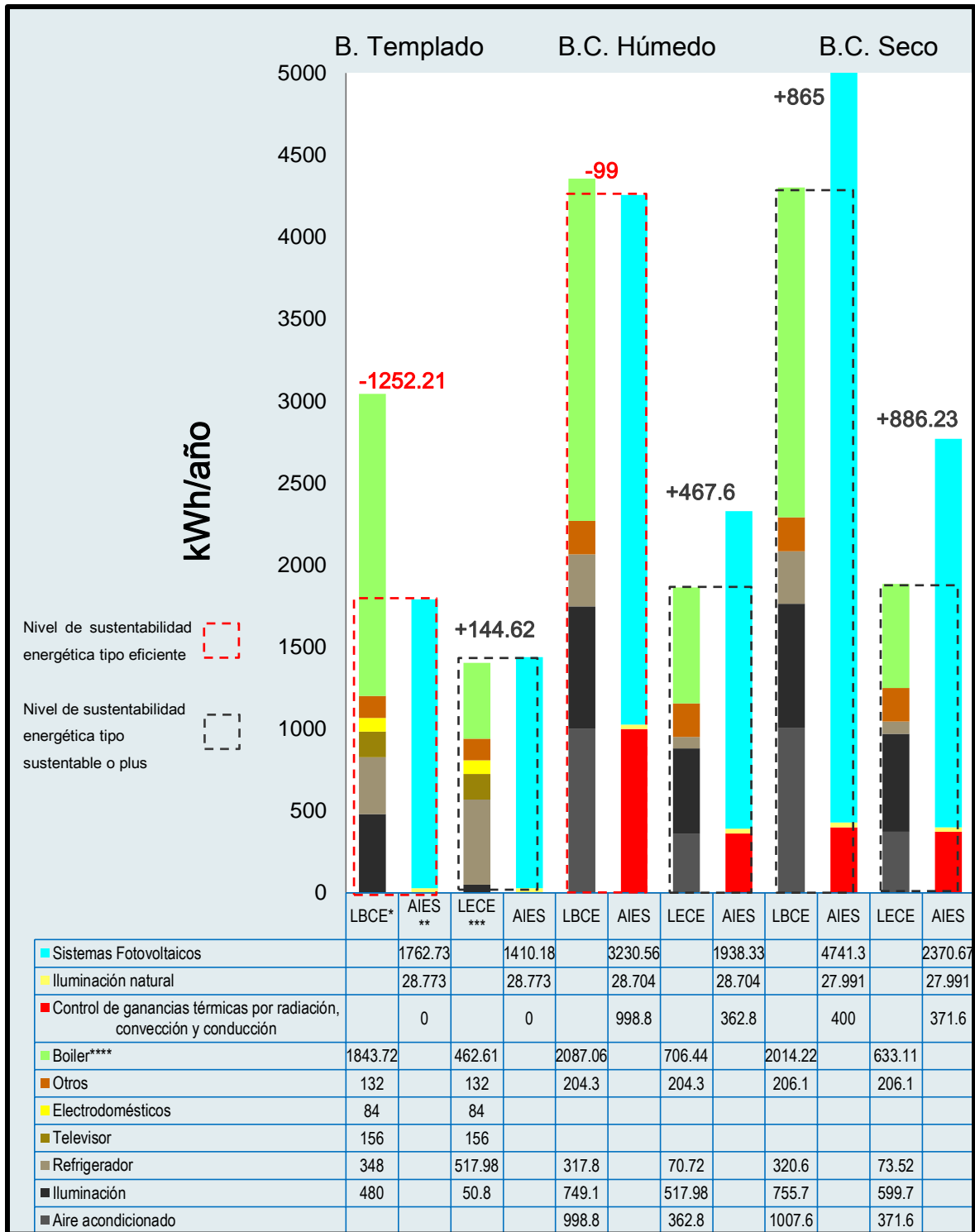
Para mejorar el nivel de sustentabilidad energética de una manera económica y viable, se consideró una línea eficiente de consumo energético para cumplir con ese objetivo. Se disminuyeron los SFV requeridos para satisfacer la demanda de energía, presentando los mayores beneficios nuevamente el bioclima cálido seco con un excedente de energía de 886.231 kWh/año, continuado con el bioclima cálido húmedo con 467.6 kWh/año y dejando al bioclima templado en último lugar generando 144.623 kWh/año excedentes, logrando en los tres casos de estudio un nivel de sustentabilidad energética tipo Plus Energy (Gráfica 5.9).

Proviene una serie de observaciones de la gráfica del balance de energía general anual, donde el diseño bioclimático principalmente en los bioclimas cálidos tiene un papel primordial para poder reducir el uso del aire acondicionado e incluso lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable o plus energy, mientras que en el bioclima templado debido a sus características no repercute de manera importante.

Al subestimar los beneficios energéticos de la iluminación natural por la sustitución de una LFC de 23 W de potencia con la iluminación natural en un tiempo establecido por los autores de este trabajo, no se muestra una diferencia marcada en los casos de estudio.

El uso del colector solar plano por termosifón, toma relevancia debido a que el calentamiento de agua es uno de los usos finales que representa los mayores consumos de energía en la vivienda, el porcentaje de energía cubierta para este uso final por el uso del colector solar se encuentra entre 56% y 61% de ahorro en los casos de estudio.

La generación de energía eléctrica con sistemas fotovoltaicos es una de las medidas más importantes a considerar para lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable o plus, pero antes de realizar su dimensionamiento, para reducir el número de sistemas fotovoltaicos y mejorar el nivel de sustentabilidad energética en los edificios, se debe considerar el uso de tecnología eficiente como LFC, refrigeradores no mayores a 10 años de antigüedad, aire acondicionado eficiente, boiler instantáneo termostático, así como realizar diseño arquitectónico adecuado a las características del lugar, siendo el bioclima cálido seco debido a su alta incidencia de irradiación global el que mostró la mayor generación de energía eléctrica.



Gráfica 5.9 Balance de energía general anual (kWh/año) entre la demanda de energía (línea de consumo energético) y la energía generada aprovechando la energía solar

*LBCE: Línea base de consumo energético; **AIES: Aprovechamiento integral de la energía solar; ***LECE: Línea eficiente de consumo energético; ****Se convierten los kg GLP/año a kWh/año y se considera el consumo del boiler al restar a la línea base por consumo de gas el uso de CSA y a la línea eficiente por consumo de gas el uso de CSA y boiler instantáneo termostático

5.2 Beneficios ambientales: Mitigación de CO₂

En este subcapítulo se presentan los beneficios ambientales al comparar la mitigación de CO₂ por definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios considerando diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica con la generación de CO₂ establecido por una línea de consumo energético (Gráfica 5.10).

En la gráfica 5.10 se muestra que se mitiga entre 89% y hasta 150% de kg de CO₂ eq/kWh anual al comparar el aprovechamiento de la energía solar con una línea de consumo energético para los casos de estudio, cabe señalar que se considera la mitigación de kg de CO₂ eq/kWh anual tomando como referencia el balance energético general, siendo los bioclimas cálidos los que mayores beneficios ambientales presentan.

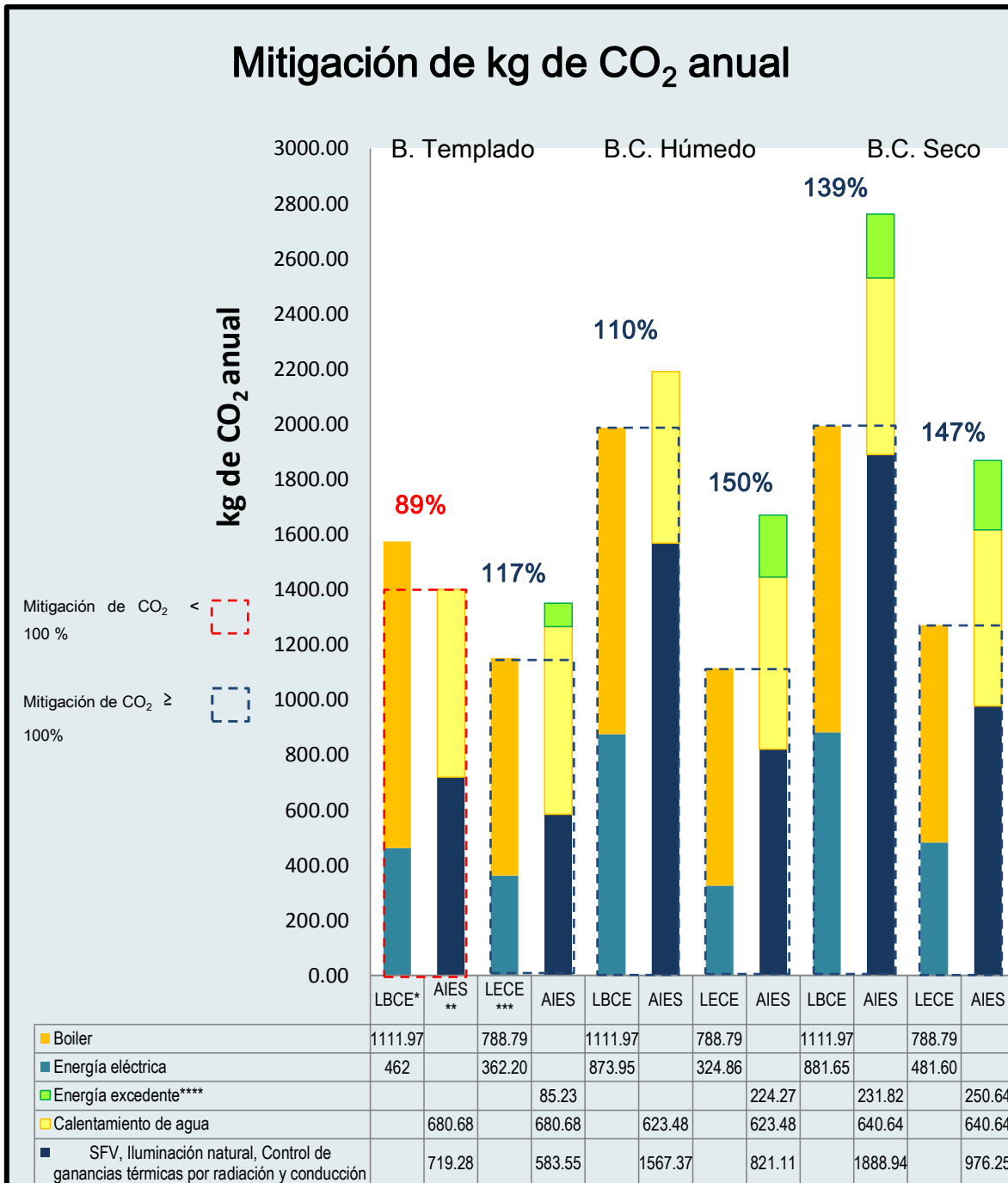
5.3 Beneficios económicos

Se logra un ahorro económico importante al utilizar un calentador solar de agua, evitando un gasto anual de entre 56% a 61% por el uso final de calentamiento de agua (Tabla 5.2), variando los resultados de acuerdo a las características específicas de cada bioclima.

Tabla 5.2 Ahorro económico anual, al abastecer de manera parcial el uso final de calentamiento de agua con un colector solar plano, en los casos de estudio

Bioclima	Ciudad	\$/kg GLP*	Ahorro al utilizar calentador solar (kg GLP/año)	Ahorro Económico anual (\$/año)	Ahorro per cápita anual** (\$/año)
C. seco	Ciudad Juárez	13.39	224	2999	769
C. húmedo	P. del Carmen	13.39	218	2919	748.5
Templado	Texcoco	13.39	237.95	3186	817

Fuente: *Precio promedio nacional para el mes de octubre de 2016, Periódico la Jornada, UNAM;
**Vivienda con 3.9 habitantes (INEGI, 2010)



Gráfica 5.10 Mitigación de kg de CO₂ anual por definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en los edificios considerando diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica comparado con la generación de CO₂ de una línea base y una línea eficiente de consumo energético, en los casos de estudio
*LBCE: Línea base de consumo energético; **AIES: Aprovechamiento integral de la energía solar; ***LECE: Línea eficiente de consumo energético; ****Energía excedente por el AHES, dato proporcionado en el balance energético general

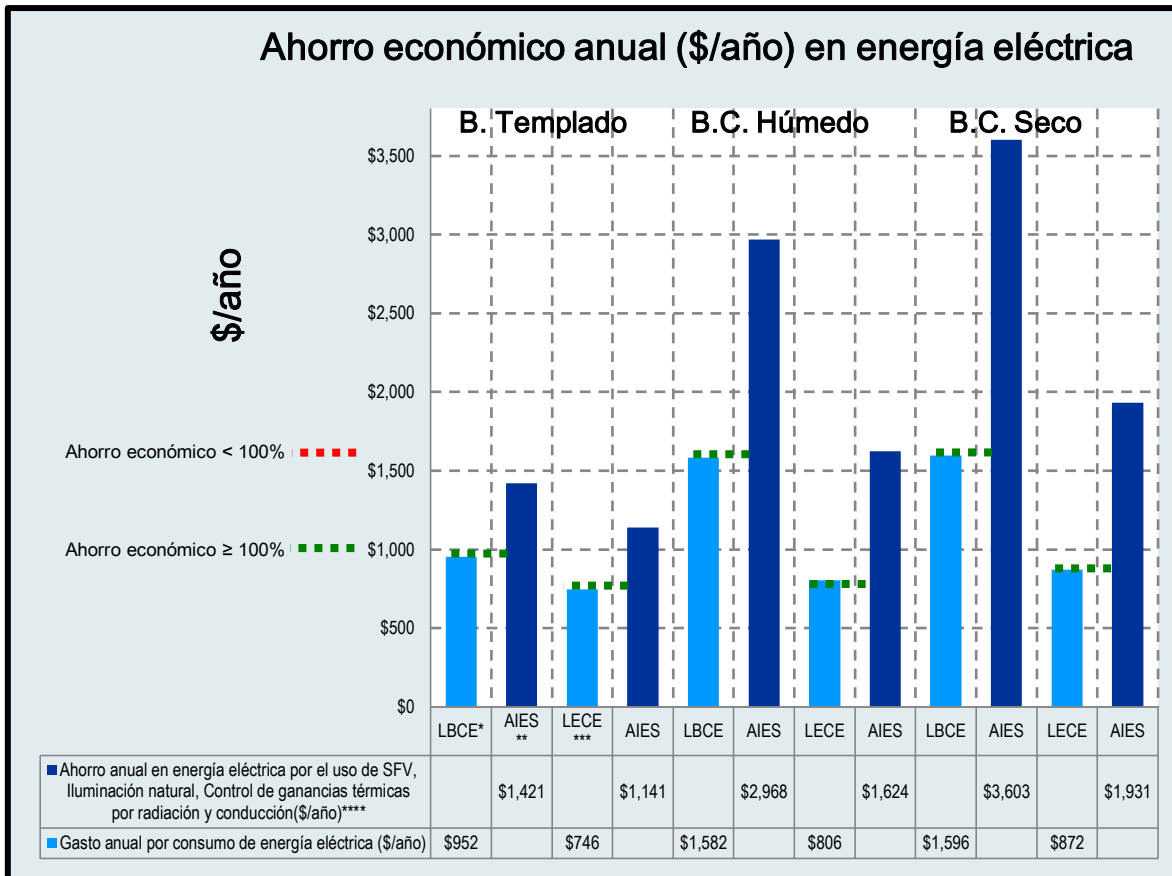
Se obtuvo un gran beneficio económico por la generación y ahorro de energía eléctrica anual –kWh/año- al aprovechar integralmente la energía solar (iluminación natural, generación de energía eléctrica con SVF y control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción), que se presenta en los casos de estudio (Gráfica 5.11), además de ser energía limpia que satisface los requerimientos energéticos de manera total o parcial en una vivienda.

Tabla 5.3 Tipo de Tarifa y costo por kWh, para los casos de estudio

Bioclima	Ciudad	Tarifa*	\$/kWh**
Cálido seco	Cd. Juárez	1B	0.697
Cálido húmedo	Playa del Carmen	1B	0.697
Templado	Texcoco	1	0.793

Fuente: *Comisión Federal de Electricidad, México 2016; **Precio correspondiente al tipo de tarifa en un rango de consumo básico para la temporada de verano, CFE 2016

En la gráfica 5.11 se observa que al comparar el ahorro económico anual de energía eléctrica con el uso de SFV, iluminación natural y control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción, con una línea base de consumo eléctrico y con una línea eficiente de consumo eléctrico, para todos los casos se tiene un ahorro económico anual $\geq 100\%$, sin embargo, actualmente en México aún no existen incentivos económicos por la energía eléctrica excedente inyectada a la red por eso que se considere máximo 100% de ahorro económico.



Gráfica 5.11 Ahorro económico anual en energía eléctrica por el uso de SFV, iluminación natural y control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción, para los casos de estudio

*LBCE: Línea base de consumo energético; **AIES: Aprovechamiento integral de la energía solar; ***LECE: Línea eficiente de consumo energético; ****Ahorro económico anual por concepto de energía eléctrica: utilización de la energía solar

6.0 Conclusiones

Como aporte principal de este trabajo, se desarrolló un método para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica en los edificios, validando dicha propuesta en una vivienda de interés social en ciudades con los tres climas más representativos de México: cálido seco, cálido húmedo y templado.

La primera etapa del método elaborado consistió en analizar la línea base de consumo de energía y usos finales, así como se realizó un diagnóstico conformado de un estudio del bioclima y un estudio de la radiación solar, proporcionando áreas con potencial de ahorro y de generación de energía.

Posteriormente se propusieron estrategias de adecuación climática en la construcción y recomendaciones del uso de tecnologías solares, clasificadas según el tipo de aprovechamiento de la energía solar: pasiva o activa. Para el aprovechamiento de la energía solar en forma pasiva, se establecieron los requerimientos de climatización con el diagrama de isorrequerimientos permitiendo realizar un diseño y edificación apropiada que consideró iluminación natural, control solar y uso de materiales de construcción adecuados que además de satisfacer los requerimientos lumínicos y estructurales del edificio se provocó o conservó la sensación de confort higrotérmico en el usuario. Una vez establecido el potencial del recurso solar y la línea base de consumo energético se dimensionó el colector solar plano para el calentamiento de agua y los sistemas fotovoltaicos para la generación de energía eléctrica, solo este último aprovechó la energía solar de forma activa.

Los beneficios energéticos, ambientales y económicos logrados, partieron de los resultados obtenidos en el balance de energía entre la energía generada por el aprovechamiento integral de la energía solar considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica en la vivienda de interés social, comparada con una línea base de consumo de energía. Debido a que el nivel de sustentabilidad energética fue de tipo eficiente al integrar la energía solar en los bioclimas cálido húmedo y templado, se consideró una línea eficiente de consumo energético para lograr un nivel tipo sustentable o plus energy.

Una vez validado el método en los casos de estudio para definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar en una vivienda de interés social, permite concluir lo siguiente:

- ◆ El potencial de ahorro energético por dejar de utilizar aire acondicionado en una vivienda de interés social en los casos de estudio al considerar el control de ganancias y/o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en la envolvente para el bioclima cálido húmedo es de 998.8 kWh/año, seguido por el cálido seco con 400 kWh/año y el templado es el que presenta los menores ahorros energéticos con 12.61 kWh/año, al comparar la vivienda proyectada con una vivienda de referencia definida por la NOM-020-ENER-2011, el bioclima templado presentó 31.12% más eficiencia en la vivienda proyectada comparada con la de referencia, seguido por el cálido húmedo con 36.59% y 47.42% para el cálido seco, mostrando que en los casos de estudio se garantizó el confort higrotérmico sin la necesidad de utilizar climatización activa la mayor parte del tiempo.
- ◆ Se concluye que la iluminación natural puede ser aprovechada entre 89.75% y 91.3% del tiempo con horas diurnas conforme a lo mostrado en los casos de estudio, adicional a satisfacer los requerimientos lumínicos del edificio se provocaría o conservaría la sensación de confort higrotérmico en el usuario al seleccionar de manera adecuada la iluminación natural directa o indirecta.
- ◆ De acuerdo a los resultados obtenidos en el balance de energía, se determinó el nivel de sustentabilidad energética alcanzado en los casos de estudio, concluyendo que al comparar la generación de energía por el aprovechamiento integral de la energía solar con la línea base de consumo energético únicamente el bioclima cálido seco logra el tipo plus energy, y al compararla con una línea eficiente de consumo energético además de reducir el número de sistemas fotovoltaicos, se logró en los tres casos de estudio el nivel de sustentabilidad tipo plus energy, es decir, se generó más energía de la demandada para satisfacer los requerimientos de energía eléctrica y de calentamiento de agua en la vivienda de interés social. Se presentó mayor potencial de generación de energía eléctrica en el bioclima cálido seco, un mayor potencial de ahorro de energía eléctrica con el control de ganancias o pérdidas térmicas por radiación, convección y conducción en la envolvente en el bioclima cálido húmedo y una factibilidad mayor de lograr la sustentabilidad energética en el bioclima templado debido a sus características específicas.

- ◆ La mitigación de kg de CO₂ eq/kWh anual está directamente relacionada con los beneficios energéticos, considerando los kWh/año ahorrados por el aprovechamiento de la energía solar en los casos de estudio, se tendría una mitigación de hasta 2761.4 kg de CO₂ eq/kWh/año por vivienda en el bioclima cálido seco, 2190.85 kg de CO₂ eq/kWh/año en el bioclima cálido húmedo y 1400 kg de CO₂ eq/kWh/año en el bioclima templado, donde adicional a generar su propia energía para abastecer los requerimientos energéticos de la vivienda se reduce el consumo de energía generada con fuentes naturales no renovables, contribuyendo a la conservación del medio ambiente y a mejorar la calidad de vida de las personas.
- ◆ Otro aporte de este trabajo fue la elaboración de un catálogo tecnología-beneficio que se proyecta en el balance de energía general mostrando el ahorro y generación de energía al utilizar la energía solar, donde se pueden integrar todas las tecnologías aquí propuestas o de manera particular, con el objetivo de contribuir en el diseño, construcción y operación de edificios sustentables energéticamente.

Los resultados obtenidos confirman la hipótesis que al definir requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar considerando el diseño bioclimático, iluminación natural, tecnología térmica y fotovoltaica en los edificios, se puede lograr un nivel de sustentabilidad energética tipo sustentable energéticamente o plus energy, además de provocar o conservar confort higrotérmico en los usuarios. En ciudades con los tres bioclimas más representativos de México se logró un nivel plus energy al comparar los beneficios del aprovechamiento integral de la energía solar con una línea eficiente de consumo energético, sin embargo, cada etapa del método debe ser respetada para alcanzar satisfactoriamente los beneficios energéticos, ambientales y económicos presentados en este trabajo.

Para futuras investigaciones en la misma línea de trabajo se presentan las siguientes recomendaciones:

- ◆ Elaborar una base de datos actualizada del consumo final de energía, así como de sus usos finales para edificios residenciales y no residenciales para cada localidad.
- ◆ Desarrollar un catálogo para cada ciudad, de los materiales de construcción, filtros solares para ventanas y del control solar (aleros, partesoles, ventanas con remetimiento) más adecuados para ahorrar energía al reducir la transferencia de calor a través de la envolvente.

- ◆ Realizar un estudio que muestre el impacto térmico en las sensaciones higrotérmicas del usuario por el uso adecuado de la iluminación natural (directa o indirecta) en los edificios.
- ◆ Explotar el vasto potencial del recurso solar en México con el uso de calentadores solares de agua y sistemas fotovoltaicos, para que en conjunto con otras energías renovables se obtenga una seguridad energética, así como cumplir con la responsabilidad social de cuidar el medio ambiente.
- ◆ Realizar la validación del método de manera experimental para evaluar el nivel de sustentabilidad energética que se puede alcanzar en cada bioclima.

Finalmente, se exhorta a continuar con la misma línea de investigación, para ampliar el conocimiento en el tema de sustentabilidad energética, así como de los beneficios ambientales, económicos y sociales que se pueden alcanzar al definirse requerimiento, potencial y aprovechamiento de la energía solar.

Referencias

Almanza R. & Cajjgal V., (2005). Irradiaciones global, directa y difusa, en superficies horizontales e inclinadas, así como irradiación directa normal, en la República Mexicana. Serie investigación y desarrollo, UNAM, SID/646.

Amado M., Ferrero N., Medina M. & Lara M., (2005). Ahorro energético con energía solar para una residencia universitaria. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 9, 2005. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

Andrade A. & Morillón D. (2009). Diagnóstico del comportamiento térmico, energético y ambiental de la vivienda de interés social en México: retrospectiva y prospectiva (2000-2012), Los edificios en el futuro, estrategias bioclimáticas y sustentabilidad, Ed. INETI-CYTED, ISBN: 978-972-676-209-6, Portugal.

Asociación de Normalización y Certificación, A.C, (2012). Especificaciones técnicas de seguridad y funcionamiento de proyectos e instalaciones de sistemas fotovoltaicos, ANCE, México.

Balance nacional de energía, (2013). SENER, México.

C. Mueller & H. Kleine, (2003). Aprovechamiento integrado de energía solar para calefacción de ambientes, agua caliente y cocción comunitaria en el altiplano argentino. Avances en energías renovables y medio ambiente vol. 7, nº 1, 2003. Impreso en la argentina. ISSN 0329-5184.

Ceballos F. & Morillón D. (2012), Metodología para la sustentabilidad energética: la vivienda Net Zero Energy, Tesis UNAM, México.

Chávez J. & Almanza R. (2009), Evaluación experimental de propiedades térmicas de materiales de construcción nacionales y desarrollo de ventanas ahorradoras de energía, Tesis de doctorado, UNAM, México.

Código de edificación de vivienda (2010), CONAVI.

Comisión Federal de Electricidad, (2016). Tarifas domésticas, CFE, México.

Comisión Nacional para el Ahorro de Energía, (2007). Programa para la Promoción de Calentadores Solares de Agua en México, (PROCALSOL) 2007-2012, CONAE, ANES y GTZ, México.

Comisión Nacional para el Uso Eficiente de la Energía, (2009). Nichos de mercado para sistemas fotovoltaicos en conexión a la red eléctrica en México, México.

CONAVI (2006), Guía para el uso eficiente de la energía en la vivienda, 1ra. Ed., México.

CONAVI (2007), Código de Edificación de Vivienda, CONAVI, 1ra. ed., México.

CONAVI (2008), Criterios e indicadores para desarrollos habitacionales sustentables, México.

CONAVI (2009), Programa específico Desarrollo Habitacional Sustentable ante el Cambio Climático, CONAVI, México.

CONAVI (2010), Código de Edificación de Vivienda, CONAVI, 2da. ed., México.

Conociendo México (2012). INEGI, México.

Correa G. & Almanza R., (2002). Fabricación de filtros solares para ahorro de energía con recubrimientos de Cu₂O-CuS y VO₂, Tesis de doctorado, UNAM, México.

Criterios e indicadores para desarrollos habitacionales sustentables (2008).

Duffie, J. & Beckman, W., (2006). Solar Engineering of Thermal Processes, 3rd Ed., John Wiley and Sons Inc. New Jersey, USA.

Duffie J. and Beckman W. (2013), Solar Engineering of Thermal Processes, Wiley Interscience, New York, USA.

Echeverría A., (2011). Conferencia Casas Cero Energía Tecnologías verdes en la vivienda de interés social en México, México.

Exploring options for Sectoral Crediting Mechanisms, (2005). OECD.

Euro Sun (2014). International Conference on Solar Energy and Buildings, International Solar Energy Society, Alemania, ISBN: 978-3-9814659-3-8.

Fideicomiso N. 728, (1990). Fideicomiso para la constitución de un fondo resolvente de financiamiento para el programa de aislamiento térmico de la vivienda (FIPATERM), México.

Fondo Europeo de Desarrollo Regional, (2012). Aragón, España.

García I. & Morillón D., (2011). Línea base del uso final de la energía eléctrica en edificios comerciales y de servicios de la República Mexicana: indicadores energéticos. Tesis de Maestría, UNAM.

Givoni, B., (1976). Man, climate and architecture. 2nd Ed. London, Applied Science Publishers.

Gómez G., (1991), Procedimiento para evaluar la eficiencia de los dispositivos de sombreado, Memorias de la XV Semana Nacional de la Energía Solar, Asociación Nacional de Energía Solar, Zacatecas, Zac, México, p. 200- 204.

Green Building Research, (2010). US Green Building Council, USGBC, EUA.

Indicadores de Eficiencia Energética en México: 5 sectores, 5 retos, 2011, (2011). SENER, México.

Indicadores de eficiencia energética: Bases esenciales para el establecimiento de políticas, (2015). International Energy Agency.

Instituto Mexicano de Energía Solar.

Instituto Nacional de Estadística y Geografía, (2015). México.

Lee K., Lee J., Yoon E., Joo M., Lee S. & Baek N., (2014). Annual measured performance of building-integrated solar energy systems in demonstration low-energy solar house. Journal of renewable and sustainable energy 6, 042013 (2014).

Li D., Liu G. & Liao S., (2015). Solar potential in urban residential buildings. Solar Energy 111 (2015) p. 225–235.

Mejía D. & Morillón D., (2004), Modelo para diseño y evaluación del control solar en edificios, Tesis UNAM, México.

Mesa A. & Morillón D., (2010), Métodos para evaluar el potencial y aprovechamiento pasivo de la energía solar en entornos urbanos. Caso de estudio: Área metropolitana de Mendoza, Argentina, Serie investigación y desarrollo, UNAM, SID/665, p.75 - 107.

Moldovan M. & Visa I., Burduhos B., (2011). Energetic autonomy for a solar house. *Environmental Engineering and Management Journal*, september 2011, Vol.10, No. 9, 1283-1290.

Morillón, D., (1993). *Bioclimática: Sistemas pasivos de climatización*, UDG, Guadalajara, Jalisco.

Morillón D., (2001), *Evaluación y Comparación del Comportamiento Térmico del Concreto Celular*, Proyecto No. 1135 para la Empresa Cemex-Concreto, Realizado en el Instituto de Ingeniería-UNAM, México.

Morillón D., (2002). *Metodología para el diseño bioclimático*, Memorias del Millennium Forum Solar, International Solar Energy Society y ANES, México.

Morillón D., (2004). *Atlas del bioclima de México*. México, D.F.: Serie Investigación y Desarrollo, UNAM.

Morillón D., (2007). Bases para una hipoteca verde en México, camino a la vivienda sustentable, en *Estudios de Arquitectura Bioclimática Anuario 2007 Vol. IX*, Fuentes Freixanet Victor A., Ed. Limusa, México.

Morillón D., (2007). *Guía Metodológica para uso de tecnologías para el ahorro de energía y agua en la vivienda de interés social en México*, CONAVI, México.

Morillón D., (2007), *Habitabilidad térmica en la vivienda*, V Simposio Nacional de Ingeniería Estructural en la Vivienda, México.

Morillón D., (2008), *Bases para el Programa MDL de Desarrollo Habitacional Sustentable en México*, Comisión Nacional de Vivienda, México.

Morillón, D., (2009). *Línea base para la vivienda sustentable en México: GEI*, Informe Técnico, Comisión Nacional de Vivienda - Banco Mundial, México.

Morillón D., Rosas D., Castañeda G. & Resendiz O., (2011). *Materiales y sistemas constructivos usados en techos y muros de la vivienda en México*, Memorias de la XXXV Semana Nacional de la Energía Solar, Asociación Nacional de Energía Solar, México, p. 228-234.

Morillón D., (2012). *Evaluación de las tecnologías*, Reporte para Grupo de Tecnologías Sustentables e Instituto de Ingeniería-UNAM, México.

Muneer T., (2004). *Solar Radiation and Daylight Models*, 2nd Ed. Elsevier, London, United Kingdom.

National Solar Conference (2016). American Solar Energy Society, ISBN: 978-3-9814659-4-5, EUA.

NMX-ES-001-NORMEX-2005, (2005). Rendimiento térmico y funcionalidad de colectores solares para calentamiento de agua- métodos de prueba y etiquetado, México.

NMX-ES-003-NORMEX-2007, (2008). Requerimientos mínimos para la instalación de sistemas solares térmicos, para calentamiento de agua, México.

NMX-ES-004-NORMEX-2010, (2010). Evaluación térmica de sistemas solares para calentamiento de agua-método de prueba, México.

NOM-018-ENER-1997, (1997). Aislantes térmicos para edificaciones. Características, límites y métodos de prueba.

NOM-020-ENER-2011, (2011). Eficiencia energética en edificaciones. Envolvente de edificios para uso habitacional, SENER, México, DF.

NOM-025-STPS-2008. (2008). Condiciones de iluminación en los centros de trabajo, México.

Olgay, V, & Olgay, A., (1957). *Solar control and shading devices*, Princeton University Press, Princeton, Nueva Jersey, EUA.

Olgay, V., (1963). *Design with climate*. Princeton University Press, Princeton.

Organismo Nacional de Normalización y Certificación de la Construcción y Edificación, S.C., (2009), NMX-C-460-ONNCE-2009 Industria de la Construcción - Aislamiento térmico Valor "R" para las envolventes de vivienda por zona térmica para la República Mexicana - Especificaciones y Verificación -, México.

Pérez, R., Ineichen, P., & Seals, R., (1990). Modelling daylight availability and irradiance components from direct and global irradiance. *Solar Energy*, 271-289.

Polanco J. & Yousif C., (2015). Prioritising energy efficiency measures to achieve a zero net-energy hotel on the island of Gozo in the central Mediterranean. 7th

International Conference on Sustainability in Energy and Buildings, Energy Procedia 83 (2015) 50 – 59.

Preciado O., & Morillón D., (2010). Metodologías para la evaluación del potencial de la iluminación natural y su aprovechamiento en los edificios: caso de estudio Pachuca, Hidalgo. Memorias XXXIV de la Asociación Nacional de la Energía Solar.

Preciado O. & Morillón D., (2011). Potencial estimado de la iluminación natural en México. Tesis, UNAM, México.

Preciado O. & Morillón D., (2010). BIOSOL: Software para el estudio del bioclima, control solar e iluminación natural. Memorias de la IV Conferencia Latino Americana de Energía Solar (IV ISES_CLA) y XVII Simposio Peruano de Energía Solar (XVIIISPES).

Ramos G. & Patiño A., (2006). Dimensionamiento, selección y beneficios del uso de calentadores solares de agua en el sector doméstico, Memorias de la XXX Semana Nacional de la Energía Solar, ANES, México, p. 567-572.

Rosas J. & Morillón D., (2009). Potencial de ahorro económico y de energía por el fomento de uso de calentadores solares en los hogares de México. Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 13, 2009. Impreso en la Argentina. ISSN 0329-5184.

Sánchez A., (2015). Dimensionamiento y diseño de sistemas fotovoltaicos interconectados a la red, Curso en la XXXIX Semana Nacional de la Energía Solar, ANES, México.

Sánchez D. & Morillón D., (2014). Parametrización del comportamiento térmico de la envolvente de la vivienda para la certificación de edificios sustentables, Tesis UNAM, México.

Sartori, I., Napolitano, A., Marszal., A. J., Pless, Sh. Torcellini, P., & Voss, K., (2010). Criteria for Definition of Net Zero Energy Buildings, Euro Conference, Graz, Austria.

SENER, (2009). Programa Nacional para el Aprovechamiento Sustentable de la Energía 2009-2012, México.

SENER, (2009). Prospectiva del sector eléctrico 2009-2024, México.

Servicio Meteorológico Nacional. (1981-2010). Normales Climatológicas. Comisión Nacional del Agua, México.

Tejeda A., (1991). An exponential model of the curve of mean monthly air temperature, *Atmosfera*, 4, p. 139-144.

Tejeda A. & García, (2002), A comparative simple method for human bioclimatic conditions applied to seasonally hot/warm cities of México, *Atmósfera* 15, p. 55-66.

Tricomi E., (2002). ABC del aire acondicionado, Ed. Alfaomega.

Tsalikis G. & Martinopoulos G., (2015). Solar energy systems potential for nearly net zero energy residential buildings, *Solar Energy* 115 (2015), p. 743–756.

Uso eficiente de la energía en la vivienda, (2006). CONAFOVI, México.

White Paper: Transición hacia un futuro basado en las Fuentes Renovables de Energía (2003). International Solar Energy Society, Alemania.

Normales Climatológicas: <http://smn1.conagua.gob.mx>